

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní
Katedra vozidel a motorů



**Monitorování vibrační stavu
střídavých elektromotorů**

**Vibration monitoring for the alternating current
electric motors' condition**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Olga Tarasenko

Květen 2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní
Katedra vozidel a motorů

Obor: B2341 strojírenství
Zaměření: 2302R022 stroje a zařízení
Dopravní stroje a zařízení

Monitorování vibrační stavu střídavých elektromotorů

**Vibration monitoring for the alternating current
electric motors' condition**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KVM – BP - 252

Olga Tarasenko

Vedoucí bakalářské práce: doc. Dr. Ing. Elias Tomeh
Konzultant bakalářské práce: RNDr. Ondřej Valent

Počet stran: 67
Počet obrázků: 24
Počet tabulek: 14
Počet příloh: 4

Květen 2012



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Olga T A R A S E N K O

obor

B2341 Strojírenství

zaměření

2302R022 stroje a zařízení

dopravní stroje a zařízení

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

MONITOROVÁNÍ VIBRACÍ STAVU STŘÍDAVÝCH ELEKTROMOTORŮ

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

Studijní a experimentální práce zaměřené na sledování poškození hlavních částí statoru a rotoru střídavého elektromotoru.

- 1) Uveďte všechny požadavky kladené na hlučnost a vibrace střídavých elektromotorů, popište metody měření, jejich diagnostiku včetně nutných inspekčních činností preventivní a prediktivní údržby.
- 2) Specifikujte závady jednotlivých částí střídavých elektromotorů a způsoby detekce hluku a vibrací střídavých elektromotorů. Využívejte principy preventivní a prediktivní údržby.
- 3) Popište poruchy střídavých elektromotorů a jejich projevy ve spektrech.
- 4) Navrhněte metodu měření, možnosti aplikací monitorování stavu elektromotorů v laboratoři KVM, včetně potřebných norem a přístrojů.
- 5) Cílem bakalářské práce je použitelnost výsledků v laboratoři KVM.



Forma zpracování bakalářské práce:

Průvodní zpráva - v rozsahu cca 40 stran textu, vč. příloh.

Text celé bakalářské práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložen na CD nosiči k tištěnému svazku originálu bakalářské práce.

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Vlk, F.: Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. Brno 2001.
- [2] Kreidl, M. – Šmíd, R.: Technická diagnostika. Praha 2006.
- [3] Chmelík, K.: Ložiskové proudy v elektrických strojích. VŠB-TU Ostrava 2008.
- [4] Časopisy a katalogy firem (SKF, CMMS, Bruel a Kjaer,).
- [5] SKF: SKF Bering and seal replacements electric motors, 2004, Publication 5272.
- [6] Tomeh, E.: Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. /Skripta TU v Liberci/, TUL Liberec, 2007.
- [7] Brüel a Kjaer: Vibration Monitoring of Machines. Denmark 1987.
- [8] Potřebné normy.

Vedoucí bakalářské práce:

doc.Dr.Ing. Elias Tomeh - TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce:

RNDr. Valent – CMMS s.r.o., Praha

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

vedoucí katedry



doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.

děkan

V Liberci dne 1. 3. 2012

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména §60 (školní dílo) a §35 (o nevýdělečném díle k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že Technická Univerzita v Liberci (TUL) má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a **prohlašuji, že souhlasím** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Jméno a příjmení: Olga Tarasenko

Adresa: ul. Dárnitský bulvár, 3/78
Kyjev 02192, Ukrajina

Datum: 24. 05. 2012

Podpis:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Olga Tarasenko', written over a dotted line.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultanta.

V Liberci 24. 05. 2012

A handwritten signature in blue ink, written in a cursive style, positioned above a horizontal dotted line.

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing. Tomehovi a konzultantu RNDr. Valentovi za poskytnuty čas a prostředky ke zpracování bakalářské práce, odbornou pomoc, cenné připomínky a rady.

Dále chci poděkovat svému manželovi za jeho podporu a trpělivost během mého zpracovávání bakalářské práce.

Monitorování vibrací stavu střídavých elektromotorů

Anotace.

Práce se zabývá monitorováním stavu střídavých elektromotorů pomocí hlukové a vibrační diagnostiky, uvádí jednotlivé legislativní předpisy pro hluk a vibrace elektromotorů, jejich vady, metody detekce a zabránění. Práce obsahuje popis a hodnocení provedených měření, návrh metody měření.

Klíčová slova:

Hluk, vibrace, střídavý elektromotor, spektrum, měření, údržba.

Vibration monitoring for the alternating current electric motors' condition

Annotation.

The work deals with the monitoring for the alternating current electric motors' condition using acoustic and vibration diagnostics, presents the legislative regulations for electric motors' noise and vibration, their defects, methods of detecting and avoiding. The work includes measurements' description and evaluation, the suggestion of measuring method.

Keywords:

Noise, vibration, electric motor by an alternating current, spectrum, service.

Obsah:

Přehled použitých symbolů a zkratk	10
1. Úvod	12
2. Elektromotor. Princip, použití, výhody a nevýhody	14
2.1 Asynchronní motor (indukční motor)	15
2.2 Synchronní elektromotor	16
3. Vibrace a hluchnost. Vliv na člověka	18
4. Požadavky kladené na hluchnost a vibrace střídavých elektromotorů	19
4.1 Hodnocení vibrací elektromotorů	19
4.2 Hodnocení hluku, vyzařovaného elektromotory	25
5. Preventivní, prediktivní a proaktivní údržba	26
6. Poruchy jednotlivých částí střídavých elektromotorů a popis jejich projevů ve spektrech	31
6.1 Problémy statoru	31
6.1.1. Výstřednost statoru	31
6.1.2. Zkratované vinutí	32
6.1.3 Uvolnění (úbytek) kovu	32
6.2 Nesoustřednost rotoru	32
6.3 Jiné problémy rotoru	33
6.3.1. Zlomené/ prasklé tyče rotoru	33
6.3.2 Drážkování	34
6.3.3 Uvolnění/ otevřené tyče	34
6.4 Problémy s fázováním	35
6.5 Problémy pulsace točivého momentu	35
6.6 Mechanické závady elektromotorů	35
6.6.1 Nesouosost	36
6.6.2 Nevývaha	36
6.6.3 Mechanické vůle	37
6.6.4 Trhlina v hřídeli	37
6.7 Poruchy ložisek	37
6.7.1. Ložiskové proudy	38
7. Postup pro měření vibrací elektromotorů	40

8. Příklady měření vibrací	43
8.1 Elektromotor 1LA7106-6AA-10z firmy SIEMENS.	43
8.2 Elektromotor AIR 160S8/4 firmy MEZ	47
8.3 Elektromotor Frézky Typ OR57	53
8.4 Elektromotor brusky typu B 175-04 firmy ELKO	55
Závěr	59
Přílohy	60
Seznam použitých termínů	64
Seznam zdrojů a literatury (včetně ISOČSN)	65

Přehled použitých symbolů a zkratk:

Symbol, zkratka	Jednotky	Definice, poznámky
D	–	Decibelový rozdíl mezi amplitudami
D_{des}	mm	Průměr desky pro uchycení při pevném uložení stroje
d_T	mm	Průměr tělíska ložiska
d_R	mm	Rozteč tělíska ložiska
FFT	–	Fast Fourier Transform
f_1	Hz	Frekvence statorového proudu
f_2	Hz	Frekvence rotorového proudu
f_O	Hz	Frekvence poruchy vnějšího kroužku ložiska
f_i	Hz	Frekvence poruchy vnitřního kroužku ložiska
f_v	Hz	Frekvence poruchy valivého tělíska ložiska
f_k	Hz	Frekvence poruchy klece valivého ložiska
f_s	Hz	Frekvence statorových problémů (excentricita)
f_{SK}	Hz	Frekvence skluzová
f_R	Hz	Frekvence rotorová
F_L	Hz	Frekvence sítě
F_P	Hz	Frekvence pólové rychlosti
H_{hl}	mm	Výška k hornímu ložisku stroje
$L_{hr des}$	mm	Délka hrany desky pro uchycení při pevném uložení stroje
L_p	dB	Hladina akustického tlaku, hladina emisního akustického tlaku
L_w	dB	Hladina akustického výkonu
MEZ	–	Mohelnický Elektrický Závod
n , RPM	min^{-1}	Počet otáček (rotoru) stroje za minutu, Rotation per minute
n_1	ks	Počet přerušených rotorových tyčí
n_{VT}	ks	Počet valivých tělisek ložiska
n_{RT}	ks	Počet rotorových tyčí
p	Pa	Emisní akustický tlak
p_1	ks	Počet pólových dvojic
P_0	Pa	Referenční akustický tlak, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \mu Pa$
R	ks	Počet rotorových drážek
RBPF	–	Rotor Bar Pass Frekvenci (Frekvence průchodu rotorových tyčí)
S	m^2	Plocha rovnoběžstěnu, omezujícího volný prostor ve vzdálenosti 1,0 m od stroje.

S_0	m^2	Konstantní plocha, $S_0 = 1 m^2$
S_{des}	mm	Tloušťka ocelové desky pro uchycení při pevném uložení stroje
$S_{př}$	mm	Tloušťky příruby pro uchycení při pevném uložení stroje
SK	–	Skluz
W_0	W	Referenční akustický výkon, $W_0 = 10^{-12} W$
β	grad, radián	Úhel dotyku
λ	Poruch/čas	Intenzita výskytu poruch

Poznámka k jednotkám.

$in \cdot sec^{-1}$ znamená počet palců za sekundu.

$$1 in \cdot sec^{-1} = 25,4 mm \cdot s^{-1}$$

1. Úvod

Lze říci, že začátek 21. století je nejen dobou techniky a průmyslu ale i dobou „ekologického boje“. V minulosti se člověk zabýval myšlenkou o zjednodušení těžké manuální práce což mělo za následek vznik nástroje (později i stroje). Pak následoval růst požadavků na výrobek, jeho vlastnosti a kvalitu. Od ruční práce (řemeslné výroby) člověk přechází k průmyslové výrobě (vznik sériové výroby, pak hromadné výroby). Ten rozvoj položil před výrobce otázku: jak něco vyrobit rychle a levně? Člověk se začal zabývat technologií obrábění, technologií plánování celkové výroby, zvýšil požadavky na používané materiály, kvalitu nástrojů a zdůraznil nutnost vysoké kvalifikace personálu. Bohužel, zlepšování funguje jako limita v matematice. To znamená, že směřujete k něčemu, ale nikdy nemůžete doběhnout. Ideál neexistuje. To je ten důvod, proč každý podnikatel musí sledovat veškeré vznikající novinky a směřovat k neustálému zlepšování. Jinak není konkurenceschopný.

Dnes jsme zvyklí používat techniku pro výpomoc a ani to nezaznamenáváme. Ale bez ní si nikdo nemůže ani představit svůj běžný život. Na druhou stranu, člověk se začal zamýšlet nad škodami, které svým jednáním přírodě působí, a od té doby se je snaží co nejvíce eliminovat.

Většina dopravní techniky je dnes poháněna pomocí pístových spalovacích motorů, což podle definice nemůže vyhovovat požadavkům na ideální čistotu. Za provozu v PSM se musí přivedená chemická energie transformovat v mechanickou. To znamená, že uvnitř proběhne chemická reakce a ve výsledku dostaneme škodliviny. Po optimalizaci procesů jich dostaneme méně, ale také jich tam dost zůstane.

Oproti PSM je elektromotor zdrojem čisté elektrické energie, který nemusí být obrovských rozměrů, jeho konstrukční provedení není komplikované, je relativně bezpečný, může být použit v libovolném místě (za podmínek připojení do sítě nebo jiných zdrojů elektrické energie jako baterie) a má spoustu jiných výhod.

S ohledem na výše uvedené, elektromotory se používají u hydraulických čerpadel, domácích spotřebičů a v průmyslu.

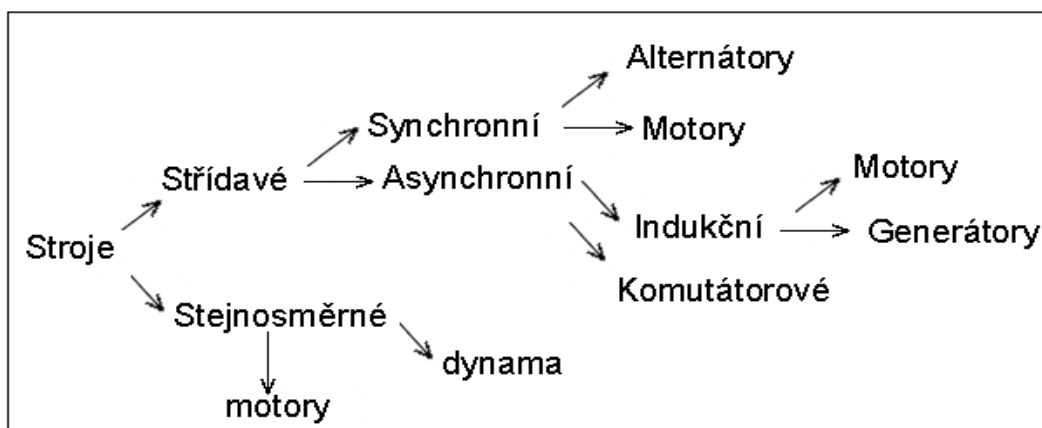
Navíc existují úspěšné pokusy použití střídavých elektromotorů (synchronních) jako zdrojů dodatečné energie (hybridní vozidla) anebo i jako hlavních pohonných jednotek (elektromobily). Výrobci moderních aut kladou velký důraz na rozvoj těchto koncepcí a podle jejich předpokladů, počet aut pohaněných

elektromotorem, bude neustále vzrůstat z každým rokem. Proto analýzy a rozpracování témat, které se týkají elektromotorů, jsou dnes velmi aktuální.

Za účel výsledku mé bakalářské práce považuji možnost využít jí jako návod k monitorování stavu střídavých elektromotorů v laboratořích a na pracovištích, včetně laboratoří KVM Technické Univerzity v Liberci, protože tato práce v sobě obsahuje veškeré informace pro sledování stavu a zjištění závad hlavních částí střídavých elektromotorů pomocí hlukové a vibrační diagnostiky.

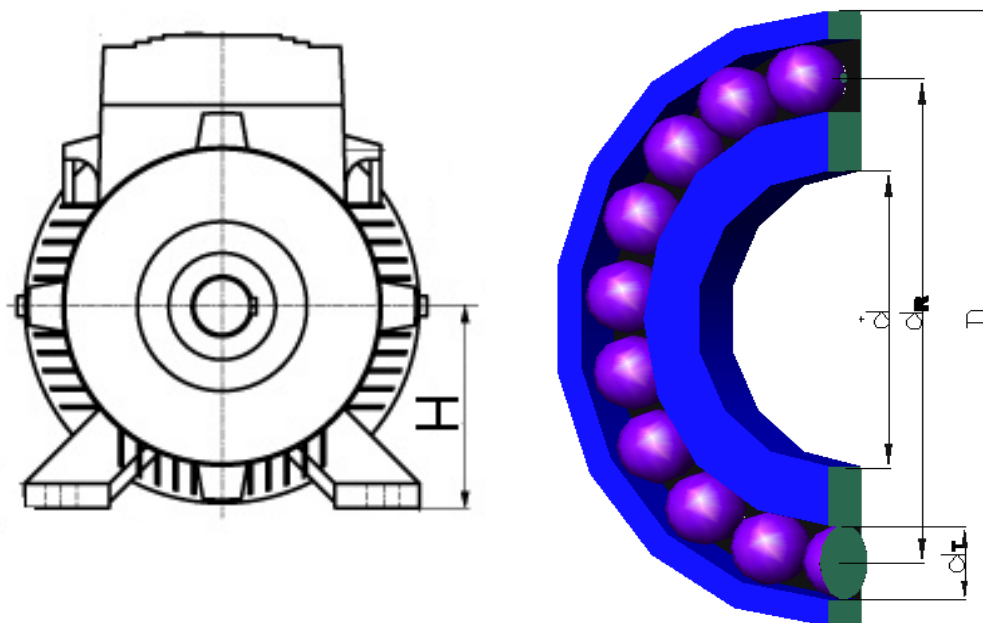
2. Elektromotor. Princip, použití, výhody a nevýhody.

Elektrické točivé stroje jsou zařízení, jejichž činnost je závislá na elektromagnetické indukci, a které jsou schopny přeměňovat elektrickou energii v mechanickou (elektromotory) nebo jí naopak z mechanické energie vyrábět (generátory). Jsou to zařízení pro regulaci napájení nebo absorbování jalové energie. je dle obrázku 1.



Obr. 1. Základní rozdělení elektrických točivých strojů

Každý elektrický stroj má dvě hlavní části: stator (pevná část) a rotor (točivá část). Obě části se skládají z magnetického obvodu a elektrického vinutí. Střídavé elektrické stroje rozdělujeme podle vztahu mezi rychlostí otáčení a kmitočtem napájecího napětí na synchronní a asynchronní.



Obr. 2. Ukázka výšky elektromotoru a hlavních rozměrů ložiska.

2.1. Asynchronní elektromotor (indukční).

Jedním z nejrozšířenějších elektrických strojů je asynchronní motor (indukční motor) pro svou jednoduchost, nenáročnost na údržbu, poměrně dobrou provozní spolehlivost a malou pořizovací cenu. Rozsah jejich výkonů je od několika wattů (W) po několik desítek megawattů (MW).

Asynchronní motory se často používají pro pohon nejrůznějších zařízení, která vyžadují regulaci rychlosti. Jedná se o ventilátory, čerpadla, pračky, kompresory, stavební stroje, výtahy, jeřáby, některé obráběcí stroje, pohony dopravníků, jako indukční brzdy, apod. K nevýhodám asynchronních motorů patří odběr jalové energie z napájecí sítě, kterou tyto stroje potřebují pro svojí činnost. Mezi nevýhody napájení motorů lze uvést obtížnou regulaci rychlosti a velký proudový náraz při spouštění, ale změnou frekvence lze tento problém snadno řešit. Asynchronní motor je stroj vratný, tj. může pracovat buď jako motor nebo jako generátor (používá se pro malé vodní elektrárny, větrné elektrárny apod.), přičemž přechod z jednoho do druhého stavu je zcela plynulý.

U indukčních strojů se přenáší výkon (elektrická energie) ze statoru do rotoru přes vzduchovou mezeru pomocí elektromagnetické indukce. Rotor asynchronního stroje není elektricky spojen se statorem. Pro zlepšení magnetické vazby se snažíme, aby vzduchová mezera byla co nejmenší. Napájíme-li trojfázové vinutí asynchronního motoru ze střídavé trojfázové sítě, vytvoří se v něm točivé magnetické pole. Mezi vinutím vstupním, které se otáčí, a výstupním existuje magnetická vazba jako u transformátorů.

Základní princip: indukční čáry točivého magnetického pole protínají vodiče statorového a rotorového vinutí a indukují v nich napětí. Napětí indukované ve statorovém vinutí působí proti napětí sítě a omezuje statorový proud na hodnotu jmenovitou (frekvence statorového proudu je f_1). Napětí indukované v rotorovém vinutí, které je zapojeno nakrátko, vyvolá rotorový proud (frekvence rotorového proudu je f_2). Rotor začne být unášen točivým magnetickým polem. Otáčky rotoru jsou závislé na skluzu.

1 – Ventilátor

2 – Patka elektromotoru

3 – Žebra statoru

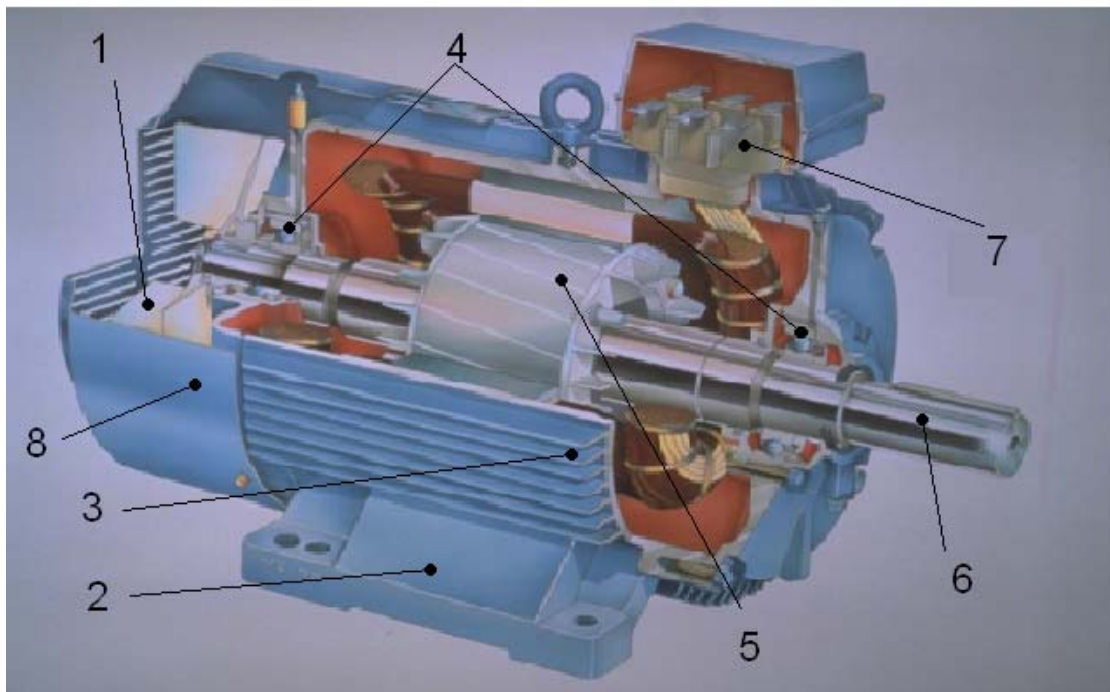
4 – Ložiska

5 – Stator

6 – Hřídel

7 – Svorkovnice

8 – Kryt ventilátoru



Obr. 3. Konstrukce asynchronního elektromotoru.

Konstrukční provedení: trojfázové asynchronní motory (s kroužkovou kotvou) mají v rotorových drážkách uloženo trojfázové vinutí, jehož konce jsou připojeny ke třem kroužkům. Kroužky jsou izolovaně nasazeny na hřídel motoru. Na kroužky dosedají kartáče, k nimž se připojuje zařízení ke spouštění nebo regulaci otáček. Na hřídeli jsou nasazena valivá ložiska a celý rotor je uložen v ložiskových štítech. Štít, na jehož straně je volný konec hřídele, nazýváme zadní. Na kostře motoru je buď odlita anebo připevněna svorkovnice, do níž jsou vedeny konce statorového vinutí.

2.2. Synchronní elektromotor:

Základní princip: rotor stroje je tvořen magnetem nebo elektromagnetem, stator, na nějž je přiveden střídavý proud, vytváří pulzní nebo častěji rotující magnetické pole. Rotor se snaží uchovat si svoji konstantní polohu vůči otáčivému magnetickému poli vytvářenému průchodem střídavého proudu ve statoru, snaží se synchronně udržet až do kritického krouticího momentu. Vůči poli statoru si udržuje skluz o úhel podle zátěže.

Změnou zátěže se úhel změní přechodovým jevem, kdy se i cyklicky po určitou dobu (řádově sekundy) pravidelně mění otáčky rotoru.

Konstrukční provedení: budící vinutí je tvořeno cívkami, které jsou nasunuty na jádrech pólů. Póly s pólovými nástavci jsou pravidelně rozloženy po obvodu rotoru — magnetového kola. Magnetové kolo je z oceli nebo složeno z ocelových plechů. Budící vinutí je napájeno stejnosměrným proudem přes dva kroužky. V pólových nástavcích bývá umístěno klecové vinutí tlumící, které má svým účinkem tlumit kývání synchronních strojů, případně u synchronních motorů umožňuje jejich rozběh.

Podle způsobu chlazení lze synchronní stroje rozdělit na stroje chlazené vzduchem, vodíkem a vodou, případně jejich kombinacemi.

K výhodám synchronních motorů (v porovnání s AM) patří:

- Konstantní otáčivá rychlost nezávislá na zatížení a napětí.
- Moment klesá úměrně s napětím sítě a tím je stabilnější než asynchronní.
- Přispívá ke stabilitě napájecí sítě.
- Má vyšší účinnost

K nevýhodám synchronních motorů patří:

- Potřeba roztočit na pracovní otáčky jiným strojem nebo pomocným asynchronním rozběhovým vinutím.
- Pokud pod zátěží ztratí synchronizaci s rotujícím polem, skokově klesne jejich výkon a zastaví se.
- Má menší momentovou přetížitelnost.
- Při stejném výkonu má vyšší pořizovací cenu.

3. Vibrace a hluchnost. Vliv na člověka.

Hluk je nežádoucí zvuk ve frekvenčním pásmu od 20 Hz do 20kHz. Formou hluku dochází k přenosu energie ze stroje do okolního prostředí.

Existují pevné požadavky kladené na hlučnost a vibrace. Samozřejmě zvětšení hluku a vibrací při provozu může ukázat, že v motoru nastala nějaká porucha, a to je první příznak pro vyloučení z provozu stroje anebo diagnostiku elektromotorů in situ. Takže, pokud pracovník nedává pozor na vznik takových změn v chování zařízení, po určité době se tento motor zastaví a jeho úprava bude mnohonásobně dražší nebo nebude vůbec možná.

Kromě toho, pokud člověk musí pracovat v prostředí s větší hlučností a vedle strojů s vibracemi, má to špatný vliv na jeho zdraví. Hluk začíná působit negativně na psychiku již v intenzitě od 22 do 26 dB, vzniká například dráždivost a nervozita. Poruchy sluchu vznikají po expozici hlukem v intenzitě 85 dB. Celkové negativní ovlivnění hlukem působí somato-psychicky: vzniká celková únava, tlak nebo bolesti hlavy, narušování koncentrace, snižování pozornosti, poruchy spánku a snížení schopnosti mentální práce.

Hluk na pracovištích se posuzuje ekvivalentní hladinou trvalého hluku v dB. Zvýšení nebo snížení hladiny hluku o 3 dB zvyšuje účinek hluku dvakrát. Specifické zdroje hluku u točivých strojů jsou ložiska, převodovky (záběr zubů), spalovací motory, kompresory apod.

Vibrace jsou mechanické otřesy, charakterizované časově pravidelnými nebo nepravidelnými výkyvy nějakého tělesa z klidové polohy.

Účinek na organizmus je dán:

- Místem vstupu otřesů do těla
- Kmitočtem (frekvencí kmitů)
- Urychlením kmitů
- Délkou doby jejich působení
- Jejich vlastní frekvencí a rezonancí

Účinek závisí značně na frekvenci, nejvýznamnější jsou odpovídající vlastním frekvencím lidského těla (rezonanční frekvence). Vibrace působí fyziologicky výrazně na svaly, oběh a dýchací systém, velmi značně na vizuální vnímání a na psychomotorické výkony, vzniká snížení mentálního zpracování informací a provádění motorických pohybů. Vibrace měřené na pracovištích mají vertikální zrychlení v rozsazích od $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ do $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Nejúčinnější frekvence vertikálních kmitů leží v mezích 4 až 8 Hz.

4. Požadavky kladené na hlučnost a vibrace střídavých elektromotorů.

Hluk a vibrace elektromotorů musí ležet v určitých mezích, limitovaných Úřadem pro technickou normalizaci, metrologií a státní zkušebnictví pomocí Československých Státních Norem (ČSN). Tímto způsobem se zajišťuje především ochrana uživatelů (zákazníka) před nekvalitním výrobkem, tzn., posuzuje shodu s požadavky technických předpisů a určuje míru spokojenosti uživatele (zákazníka). Kromě toho umožňuje porovnání výrobků mezi sebou, slouží pro účely snižování hluku a vibrací a umožňuje výrobcí deklarovat hodnoty (například vyzařovaného hluku).

4.1. Hodnocení vibrací elektromotorů.

Pro posouzení vibrací elektromotorů se obecně používá norma ČSN EN 60034-14.

(ČSN EN 60034 “Točivé elektrické stroje – část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm – Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací”.)

Tato norma je předepsána pro posouzení vibrací jak u stejnosměrných tak i u trojfázových střídavých elektrických točivých strojů s výškou osy od 56 mm (znázorněno na obr. 2), jmenovitým výkonem do 50 MW, provozními otáčkami od 120 min^{-1} do 15000 min^{-1} . Uvedená norma stanoví měřicí a zkušební podmínky, uvádí přípustné hodnoty kmitání.

Dodržení podmínek pro správné měření výchylky vibrací, efektivní rychlosti vibrací, zrychlení vibrací na ložiskách a relativní výchylky vibrací hřídele uvnitř ložisek stroje (uvedených v normě) zajišťují reprodukovatelnost zkoušek a umožňují hodnotit vibrace elektrických strojů točivých:

- Stroje musí být zkoušeny ve stavu naprázdno se jmenovitými hodnotami všech příslušných veličin, pokud možné – bez dalších připojených strojů.
- Střídavé stroje se zkouší při sinusovém jmenovitém napětí a kmitočtech. (Stejnoseměrné – při jmenovitém buzení a napětí).
- Zkouška musí být provedena při každé pevně stanovené hodnotě jmenovitých otáček nebo v celém jejich rozsahu. Přičemž při žádné hodnotě zkoušených otáček nesmí naměřené hodnoty vibrací překročit odpovídající mezní hodnoty stanovené normou.
- Pro měření vibrací a vyvažování strojů s drážkou pro pero na konci hřídele musí být drážka vyplněna púlperem, což je požadavkem ISO 8821 [30]. Výrobce a uživatel (zákazník) se mohou dohodnout jinak v mezích vlastní smlouvy pro konkrétní případ.

Měření se provádí při pružném nebo pevném uložení.

Jako pružné uložení je myšleno zavěšení stroje na pružinu nebo uložení na pružnou podložku (například pryžovou). Vlastní kmitočet stroje a systému uložení musí být ve všech šesti možných směrech (stupních volnosti) menší než $1/3$ otáčkového kmitočtu zkoušeného stroje. Potřebnou pružnost pro návrh vhodného závěsného systému lze zjistit podle grafu uvedeného v normě, na základě znalosti hmotnosti zkoušeného stroje a jmenovitých otáček od 600 min^{-1} (pro nižší otáčky měření při pružném uložení není vhodné) do 3600 min^{-1} (pro větší otáčky nesmí být statistická výchylka menší než pro otáčky odpovídající 3600 min^{-1}).

Pevné uložení se provádí v závislosti na směru přenosu točivého momentu elektrickým strojem na další příslušenství, jestliže byl navrhnut jako vodorovný nebo svislý.

Vodorovný stroj se připevňuje pomocí základové desky nebo přímo k podlaze.

Svislý stroj se montuje na pevnou pravoúhlou nebo kulatou ocelovou desku s vyvrtaným otvorem uprostřed pro konec hřídele, s obrobenou plochou pro přírubu měřeného elektrického stroje se závity pro přírubové šrouby. Tloušťka ocelové desky S_{des} je trojnásobkem tloušťky příruby $S_{př}$ nebo více.

$$S_{des} \geq 3 \cdot S_{př} \quad (1)$$

(Doporučuje se pětinásobek)

Délka hrany $L_{hr des}$ nebo průměr D_{des} desky musí nejméně odpovídat výšce stroje k hornímu ložisku H_{hl} .

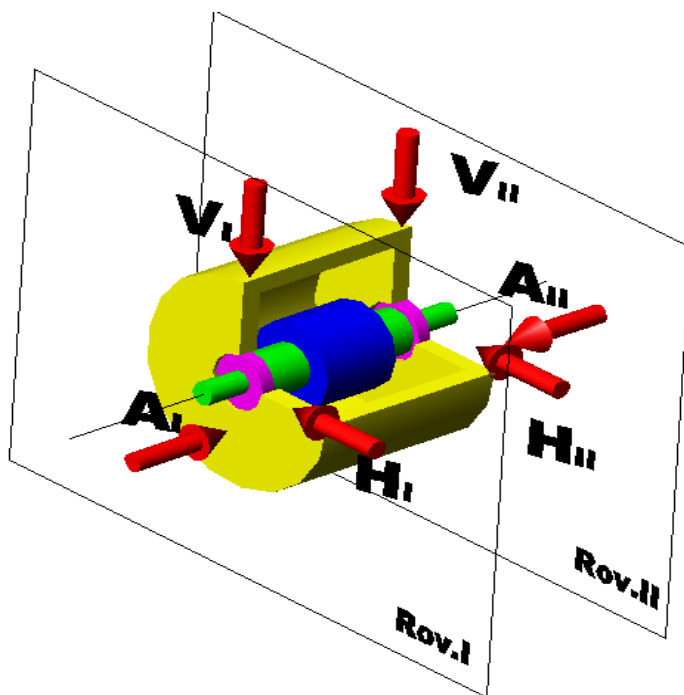
$$L_{hr des} \geq H_{hl} \quad \text{nebo} \quad D_{des} \geq H_{hl} \quad (2)$$

Při pevném uložení existuje požadavek na omezení maximální rychlosti vibrací ve vodorovném směru, kterou se dá změřit buď na patkách stroje nebo na základovém rámu v blízkosti ložisek. Naměřená hodnota nesmí překročit čtvrtinu maximální rychlosti vibrací ve stejném směru na ložiskách. Tím je zaručeno, že vlastní kmitočet celého zkušebního zařízení se v libovolném směru nebudou nakládat s následujícími kmitočty:

$\pm 10 \%$	anebo	$\pm 2 \cdot (5 \%)$	otáček stroje
$\pm 1 \cdot (5 \%)$	anebo	$\pm 2 \cdot (5 \%)$	kmitočtu sítě

Měřicí zařízení taky musí odpovídat požadavkům norem ISO 2954,
ISO 7919-3, ČSN ISO 10816-3, ISO 10817-1, ČSN EN 60034-14:

- Musí být schopno měřit efektivní hodnotu širokopásmových vibrací v kmitočtovém rozsahu od 10 Hz do 1000 Hz s plochou kmitočtovou charakteristikou. (Požadavek ISO 2954).
- Montáž snímače používaného pro měření vibrací a povrch elektrického stroje musí odpovídat specifikaci výrobce snímače a nesmí ovlivňovat podmínky pro měření vibrací.
- Hodnota celkové připojené hmotnosti sestavy snímače nesmí překročit 1/50 hmotnosti zkoušeného stroje.
- Pro správné měření jsou doporučené směry a místa měření, jako je uvedeno na obrázku 4.



Obr. 4. Předepsaná místa pro měření vibrací elektromotorů.

Při dodržení všech uvedených podmínek lze provést měření vibrací a posoudit stav zkoušeného stroje. Vyhovujícím strojem je ten, jehož efektivní hodnota rychlostí vibrací nepřekročí přípustné hodnoty mohutnosti vibrací, uvedené v tabulce č. 1, 2 a 3. Tabulka č.1 uvádí přípustné hodnoty v závislosti na kategorii (tzn. přesnost požadavků, viz dal), jmenovitých otáčkách a výšce osy stroje.. Tabulka č. 2 uvádí přípustné hodnoty pro kategorii N v závislosti na způsobu uložení stroje a jmenovitých otáčkách.

Tab. 1.: Přípustné hodnoty vibrací pro kategorie N, R, S, P

Kategorie	Jmenovité otáčky $n [\text{min}^{-1}]$	Efektivní hodnota rychlosti $v_e [mm \cdot s^{-1}]$ pro stroje s výškou osy $H [mm]$		
		$56 \leq H \leq 132$	$132 < H \leq 225$	$225 < H \leq 400$
N – normální	$3600 < n \leq 6000$	2,8	4,5	7,1
R – se zvýšenými požadavky	$600 \leq n \leq 1800$	0,71	1,12	1,8
	$1800 < n \leq 3600$	1,12	1,8	2,8
	$3600 < n \leq 6000$	1,8	2,8	–
S – zvláštní	$600 \leq n \leq 1800$	0,45	0,71	1,12
	$1800 < n \leq 3600$	0,71	1,12	1,8
	$3600 < n \leq 6000$	1,12	–	–
P – s velmi vysokými požadavky	$600 \leq n \leq 1800$	0,28	0,45	0,71
	$1800 < n \leq 3600$	0,45	0,71	1,12

Tab. 2.: Přípustné hodnoty vibrací pro kategorii N

Jmenovité otáčky $n [\text{min}^{-1}]$	Efektivní hodnota rychlosti $v_e [mm \cdot s^{-1}]$ pro stroje s výškou osy $H [mm]$			
	Stroje měření při pružném uložení			Stroje měření při pevném uložení
	$56 \leq H \leq 132$	$132 < H \leq 225$	$H > 225$	$H > 400$
$600 \leq n \leq 1800$	1,8	1,8	2,8	2,8
$1800 < n \leq 3600$	1,8	2,8	4,5	2,8

Tabulka č. 3 demonstruje rozšířenou analýzu a uvádí maximální přípustné efektivní hodnoty výchylky, rychlostí a zrychlení v závislosti na způsobu uložení, přesnosti požadavků a výšce osy (viz. příloha A).

Pro posuzování relativních hřídelových vibrací se používá norma ČSN ISO 7919-3. (ČSN ISO 7919-3 “Hodnocení vibrací strojů na základě měření na rotujících hřídelích. Průmyslová soustrojí.”)

U průmyslových strojů, včetně elektromotorů všech druhů, se obvykle měří relativní vibrace hřídele vůči ložiskům.

Uvedená norma uvádí 2 kritéria pro hodnocení:

1. Kritérium 1 stanoví meze velikosti hřídelových vibrací, které jsou v souladu s přípustným dynamickým zatížením ložisek a s přípustným přenosem vibrací na základ a nosnou konstrukci. Maximální vibrační hodnoty každého ložiska se kvalitativně posoudí pomocí 4 pásem, vzniklých na základě mezinárodních zkušeností (viz. Tab. 4).

2. Kritérium 2 uvažuje změny velikosti vibrací jako absolutní hodnotu. Posuzování se provádí vzhledem k předem zjištěné základní hodnotě, odpovídajícím ustáleným podmínkám. Základní hodnotou je typická obvyklá vibrace, která se opakuje a je známa z předchozích měření. Při náhle změně základní hodnoty (o více než 20 – 25 %) bez ohledu na to, je to přírůstek nebo pokles vibrací, se musí zjistit příčina této změny.

Tab. 4.: Hodnoty hranic pásem pro hodnocení hřídelových vibrací

Pásmo	Hranice	Odpovídající hodnota přechodu, μm	Poznámky
A	–	–	Odpovídají vibracím nově přejímaných strojů.
B	A/B	$4800/\sqrt{n}$	Teoretický stroje mohou zůstat v provozu po neomezeně dlouho dobu.
C	B/C	$9000/\sqrt{n}$	Stroje jsou považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý provoz ale mohou zůstat v provozu do nalezení možností nápravy.
D	C/D	$13200/\sqrt{n}$	Hodnoty jsou nebezpečné a mohou způsobit poškození stroje a havárii.

Poznámka k tabulce č. 4: Hodnoty hranic pásem jsou nepřímo úměrné druhé odmocnině maximálních provozních otáček hřídele n (min^{-1}).

Pro správné posouzení norma vyžaduje měřicí systém, který je schopen pracovat ve frekvencích, ekvivalentních 2,5 násobku maximálních provozních otáček n (min^{-1}) stroje.

Měření vibrací na nerotujících částech stroje se provádí metodou in situ, což znamená bez přerušení běžného normálního pracovního stavu. Správné postupy pro toto měření a hodnocení jsou popsány v normě ČSN ISO 10816-3 (ČSN ISO 10816-3: “Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech.”)

Měří se širokopásmové vibrace na běžně dostupných statických tělesech stroje, ložiskách nebo stojanech. Přičemž měřicí body jsou obvykle dva, radiální a navzájem kolmé. Měření se provádí za ustáleného provozního chodu v rozsahu jmenovitých otáček. Hodnocení se provádí pomocí 4 pásem stejným způsobem, jak je uvedeno pro hodnocení hřídelových vibrací. Hodnoty jsou v tabulkách č. 5. a č. 6.

Tab. 5.: Hodnoty hranic pásem pro hodnocení vibrací na nerotujících částech stroje s výkonem nad 300 kW do 50 MW a výškou osy nad 315 mm.

Klasifikace uložení	Hranice pásem	Efektivní hodnoty výchylky μm	Efektivní hodnota rychlosti $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Tuhé	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
Pružné	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

Tab. 6.: Hodnoty hranic pásem pro hodnocení vibrací na nerotujících částech stroje s výkonem nad 15 kW do 300 kW a výškou osy nad 315 mm.

Klasifikace uložení	Hranice pásem	Efektivní hodnoty výchylky μm	Efektivní hodnota rychlosti $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Tuhé	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
Pružné	A/B	37	2,3
	B/C	71	4,5
	C/D	113	7,1

4.2. Hodnocení hluku, vyzařovaného točivými elektrickými stroji.

Pro posouzení hluku u elektrických točivých strojů slouží norma ČSN ISO 1680 a norma ČSN EN 60034 – 9 ed.2.

(ČSN ISO 1680: “Akustika – Zkušební předpis pro měření hluku šířeného vzduchem, vyzařovaného točivými elektrickými stroji”);

ČSN EN 60034 – 9 ed.2: “ Točivé elektrické stroje – Část 9: Mezní hodnoty hluku”).

Normy uvádějí návody k měření hluku a požadavky kladené na maximální posuzované hodnoty hluku, který elektrické točivé stroje mohou vyzařovat. Jedná se o hladinu akustického tlaku L_p a hladinu akustického výkonu L_w (definici L_p , L_w a souvisejících veličin podle norem jsou uvedeny v seznamu použitých termínů).

Stroj se předem nesmí doplňkově upravovat za účelem snížení hladiny akustického výkonu buď elektrickou, mechanickou anebo akustickou cestou. Takže měření se provádí u normalizované konstrukce bez pomocného zařízení, které se dá oddělit. Během zkoušky by měl stroj pracovat za běžných podmínek. To znamená, že by měl zachovat svou pracovní polohu, pracovat při jmenovitém zatížení, kmitočtu, ve jmenovitém rozsahu otáček, přičemž tyto hodnoty se měří během zkoušky pomocí přístrojů s přesností alespoň 1,0 %. U strojů s možností reverzního chodu při předpokladu rozdílu mezi měřenými hodnotami, se zkouška provádí v obou smělech otáčení, s otáčkami, při kterých je vyzařován nejvyšší hluk.

Podobně jako při měření vibrací, hluk u menších strojů se měří při pružném uložení, u větších a zatížených strojů se měří při pevném uložení, stroje při velkém zatížení se doporučuje zkoušet in situ. Při pevném uložení se stroj pevně uchycuje na plochu pomocí pomůcek doporučených výrobcem (jako jsou patky nebo příruby apod.), které nesmí ovlivnit zkoušku kvůli dodatečnému namáhání stroje anebo zakřivení. Minimální hmotnost systému uložení se musí rovnat dvojnásobku hmotnosti stroje. Při pružném uložení vlastní kmitočet celého systému včetně zkoušeného stroje nesmí překročit hodnotu, odpovídající čtvrtině kmitočtu minimálních otáček stroje. Efektivní hmotnost systému pružného uložení nesmí být větší než jedna desetina hmotnosti stroje.

Mikrofon zvukoměru se nejčastěji umísťuje ve vzdálenosti 1m od referenčního kvádru a měří se v předepsaných bodech. Pokud určitý typ stroje na základě předchozích zkoušek prokázal nějakou stabilitu (symetrické vyzařování hluku, dostatečně rovnoměrné rozložení akustického pole, při kterém se naměřené hodnoty neliší o více

než 0,5 dB pro třídu přesnosti 2 a o 1 dB pro třídu přesnosti 3), lze připustit zjednodušení při uspořádání poloh měřících bodů u následujících zkoušek.

Při dodržení všech uvedených podmínek hladiny akustického tlaku, po korekci s ohledem na hluk pozadí, vypočítáme hladinu akustického tlaku na ploše nebo hladinu akustického výkonu. Hladina akustického výkonu je univerzálnější hodnotou z toho důvodu, že není závislá na ploše ani na podmínkách zkoušky a proto se používá pro hodnocení (porovnání s maximálními přípustnými hodnotami). Mezní hodnoty nejsou závislé na smyslu točení stroje a jsou uvedené v tabulkách č. 7 a č. 8. (Viz. příloha B a příloha C)

Hladinu akustického výkonu lze vypočítat podle vzorce:

$$L_w = L_p + 10 \cdot \lg \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (3)$$

kde

L_w -- Hladina akustického výkonu podle normy ČSN EN 60034-9;

L_p -- Hladina akustického tlaku ve volném poli nad odrazivou rovinou ve vzdálenosti 1 m od stroje;

S_0 -- velikost plochy, která se rovná $1,0 \text{ m}^2$;

S -- velikost plochy v m^2 rovnoběžstěnu, omezujícího volný prostor ve vzdálenosti 1,0 m od stroje.

Zjištěné hodnoty, způsob uložení, zvolená metoda měření a typ plochy se zanášejí do výsledného protokolu, který lze pak použít pro deklarování (viz. Příloha D).

5. Preventivní, prediktivní a proaktivní údržba

Ideální plánování údržbářských činností by mělo v sobě zahrnovat spoustu faktorů a složitě kontrolovaných procesů, které jsou proměnlivé v čase a jejich výskyt je často nepatrný. Takže by šlo o zbytečné komplikace. Jednoduše řečeno, nelze navrhnout ideální univerzální metodu řízení údržby, zejména i točivých elektrických strojů. Každá firma nebo podnik tento problém řeší odlišnými metodami a předem rozhoduje o tom, které dodržení parametrů a činností je pro ně nezbytně důležité a co mohou obětovat.

Nicméně podle statistických údajů ve většině závodů náklady na údržbu tvoří hlavní část celkových provozních nákladů, přičemž velká částka od uvedených prostředků na údržbu se promrhá neefektivními metodami řízení údržby. Převažujícím důvodem tohoto neefektivního využívání výdajů na údržbu je nedostatek faktických údajů (použití libovolných rozhodnutí), které vyčíslují, kdy a jaký druh údržby je zapotřebí pro údržbu, opravu nebo výměnu kritického strojního vybavení, zařízení a systému.

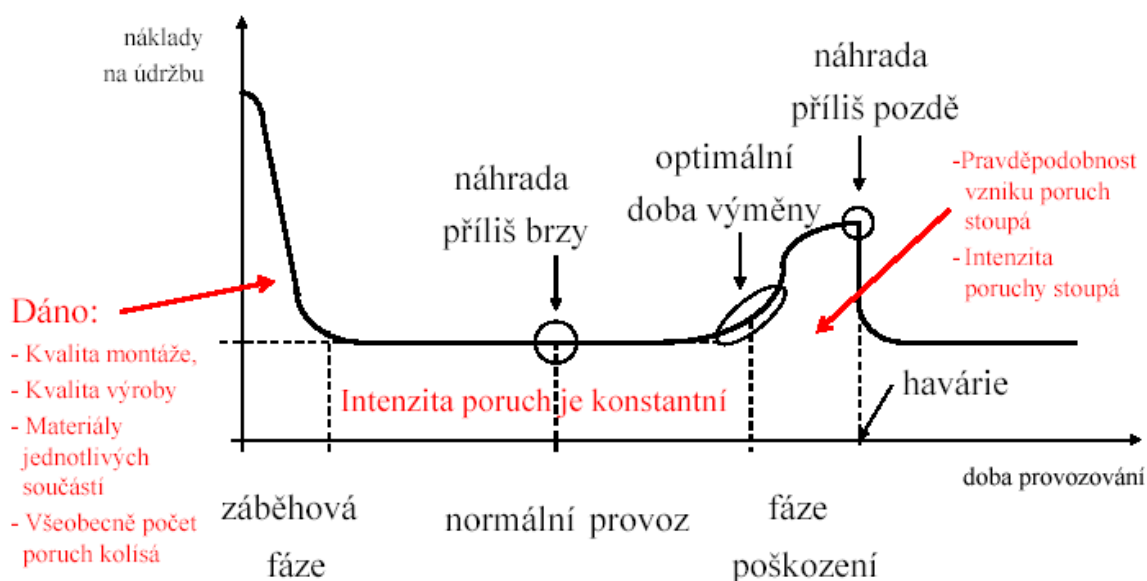
Požadavky zákazníka jsou: zachování všech výkonnostních parametrů (vlastně plnění funkcí) za provozu, spolehlivost a bezporuchový chod během celé doby životnosti, maximální (zaručená od výrobce) životnost stroje, minimální cena a náklady na údržbu.

Pro běžný podnik nemá cenu vyrábět předimenzovaný motor (cenově, technologicky i materiálově náročnější) například s příliš vysokou životností. Po určité době k jeho výměně na modernější druh může dojít spolu s jinými «levnějšími» motory při celkové modernizaci výrobní linky. Možnosti takového motoru «navíc» nebudou vůbec využity. Takže neodůvodněný přeplatek při nákupu udělá takový druh motoru nekonkurenceschopným.

Úkoly **preventivní údržby** jsou založeny na uplynulé době nebo provozních hodinách, které vycházejí ze statistických nebo historických údajů pro specifické typy zařízení. Konstruktor stanovuje životnost součástí nebo stroje na základě svých vstupních dat, jako jsou intenzita, velikost a charakter zatížení, podmínky prostředí na pracovišti, katalogové a materiálové údaje apod. Veškeré programy preventivní údržby předpokládají, že zařízení bude stárnout ve statistickém časovém rámci typickém pro jeho konkrétní klasifikaci. Pak se skutečné provádění preventivní údržby může lišit od teoreticky předepsaného. Aby stroj vyhovoval požadavkům během provozu, musí se

provádět zjištění skutečného technického stavu stroje neboli prohlídky, při výjevu poruch nebo vad a po vyhodnocení zjištěných údajů se vypracovává plán opravy.

Četnost prohlídek je stanovena ze statistických údajů provozu podobného zařízení. Když takové údaje nejsou, rozhodnutí o četnosti prohlídek se přijímá na základě předpisů od výrobce. Velká pozornost by měla být věnována fázi opotřebení strojů podle «Vanové křivky» (obr. č 5).



Obr. 5. Průběh intenzity poruch – Vanová křivka

Na začátku fáze poškození je třeba provést prohlídku, domazat nebo vyměnit ložiska, vyčistit stroj, dotáhnout šrouby atd. Pokud nebude provedena kontrolní prohlídka a uvedené úkoly, může dojít k úplnému zničení některých částí stroje, které způsobí výpadek zařízení z výrobního procesu, případně havárii stroje. Zvolení příliš krátké doby běžné údržby vede ke zbytečným údržbářským úkonům (zejména může dojít k výměně funkčních součástí stroje) a zvyšuje se riziko neodborného zásahu do stroje. Příliš dlouhá doba vede k větší pravděpodobnosti havarijního stavu. Obě varianty jdou cestou zvýšení nákladů na údržbu a opravy.

Způsob údržby podle předem schváleného časového plánu lze vylepšit zavedením pravidelné kontroly (diagnostiky) strojů. Pracovník údržby provádí pravidelnou obchůzku vybraných strojů podle časového plánu (denního, týdenního, měsíčního) a hodnotí chování stroje podle vlastních dlouhodobých zkušeností nebo na

základě hodnocení vybraných veličin (kmitání, teploty, hluky,). Pak pravidelně provádí záznamy, které po zpracování umožňují přesnější stanovení doby odstavení stroje.

Jinou metodou vylepšení je **prediktivní údržba**. Prediktivní údržba je program preventivní údržby, vycházející z daných podmínek. Místo spoléhání se na průmyslové nebo vnitrozávodní statistiky průměrné životnosti, tj. střední doby do poruchy, využívá prediktivní údržba pro plánování činností spojených s údržbou přímé sledování provozních podmínek, efektivity, rozložení tepla a další ukazatele pro stanovení skutečné průměrné doby do poruchy nebo ztráty účinnosti, která by negativně ovlivnila provoz závodu. Tato data poskytují řízení údržby faktické údaje potřebné pro efektivní plánování a rozvrhování činností spojených s údržbou, ale je i mnohem obširnější. Například pro průběžné sledování jsou stroje vybaveny čidly pro teplotu ložisek a vinutí a čidly kmitání ložiskových uzlů, které neustále monitorují stav zařízení. Čidla jsou jednoduchého typu a umožňují vyhodnocení dvou, případně tří stavů (normální provoz, zvýšená úroveň, nepřipustná úroveň). Naměřené hodnoty se předávají v určitých časových intervalech nebo průběžně na kontrolní stanoviště, kde se ukládají a porovnávají s předcházejícími a dovolenými hodnotami. Na základě jejich vyhodnocení se provádí odhad doby, kdy některé veličiny dosáhnou nepřipustných hodnot. Tento způsob vykazuje nejvyšší náklady na zavedení, avšak také nejvyšší úspory nákladů. Proto je využíván především u drahých strojů.

Třetím typem údržby je **proaktivní údržba**. Tento přístup spočívá v tom, že po sledování a hodnocení technického stavu stroje následují zásahy s cílem zabránit vzniku poškození nebo alespoň zvětšit dobu do poruchy. Hlavní důraz je kladen na příčiny vzniku poruch, které se často opakují, a na činnosti, které jim mají zabránit, ne na projevy opotřebení. Pro úspěšné zavedení proaktivní údržby je důležitá široká týmová spolupráce všech složek firmy, protože se při tom zúčastňuje širší spektrum pracovníků. V důsledku firma dostává dlouhodobou stabilitu technického stavu drahých strojů, možnosti vývoje směrem do budoucna. Větší propojení údržby a výroby dělá proaktivní údržbu nástrojem statistické regulace výrobních procesů

Cílem **běžné údržby** je snižování procesu opotřebení jednotlivých částí stroje a udržení jeho normálního provozu. Základní informace jako identifikační provozní údaje, směr otáčení, druh maziva a období domazání pro ložiska atd. jsou umístěné na výkonnostním štítku elektrického stroje neboli v technickém návodu od výrobce.

Dodržení uvedených podmínek je základem pro bezporuchový, úsporný a spolehlivý chod stroje. Při běžné údržbě je nutno provést:

- *kontrolu čistoty stroje a okolního prostředí.* Nečistoty mohou významně ovlivňovat chlazení stroje a může dojít k ucpání chladících kanálů. U hořlavého prachu může dojít při přehřátí vinutí stroje k požáru.
- *kontrolu mechanických a elektrických spojů* (kontrola dotažení stroje k základové desce, šroubů a matic ochranných krytů apod.).
- *kontrolu spojení s poháněným (poháněcím) zařízením.* Kontroluje se stav spojovací jednotky, souosost, hluk a vibrace za provozu.
- *kontrolu mazání ložisek.* Podle předepsaného období a druhu maziva se provádí domazání ložisek a kontrola přemazání anebo funkčnosti regulátoru tuku.
- *Kontrola kmitání a oteplení.* Lze provést dotykovou kontrolu nebo použít přenosné měřiče kmitání (umožňují detekovat stav ložisek a kmitání stroje) a teplot (kontrolují se teploty povrchu stroje, výstupy chladícího vzduchu, ložiskových uzlů a jednotlivých částí stroje). Jednodušší přístroje ukazují celkovou úroveň vibrací, složitější umožňují provést frekvenční analýzu naměřených signálů.
- *Kontrola hluku.* Jedná se o neobvyklé hluky. Zejména o rázy, vrčení, kolísavý hluk při zátěži apod. Použití měřících přístrojů je omezeno především hlukem okolních zařízení.

O každé běžné údržbě se provede záznam, podezření na závadu se ohlašuje zodpovědnému pracovníkovi. Na základě těchto hlášení se provede prohlídka stroje, která má za cíl určit závadu a její příčinu.

6. Poruchy jednotlivých částí střídavých elektromotorů a popis jejich projevů ve spektrech.

Veškeré problémy střídavých elektromotorů se mohou vyskytovat v

- Elektrických obvodech, tj. ve vinutích statoru nebo rotoru (například: snížení izolačního stavu vinutí, zvýšení přechodových odporů, poruchy vinutí rotoru, nedovolené oteplení vinutí apod.).
- Magnetickém obvodu statoru a rotoru (například: mechanické uvolnění paketu nebo jeho jednotlivých plechů, zkrat mezi jednotlivými plechy atd.)
- Mechanických částech (například: opotřebení nebo velké průhyby hřídele, vysoká teplota a hluk ložisek, poškození patky, excentrická vzduchová mezera apod.).

Na vznik uvedených problémů mohou ukázat zvýšené vibrace, zvýšený hluk různých částí stroje, velké oteplení aktivních nebo pasivních částí motoru, nedostatečný moment stroje při jiných jmenovitých hodnotách, deformace sinusových průběhů napájecího proudu motoru apod.

6.1. Problémy statoru

Problémy statoru budou generovat vysoké vibrace při dvojnásobku síťového kmitočtu $F_s = 2 \cdot F_L$ (4)

6.1.1 Výstřednost statoru znamená vznik stacionárně diferenciální vzduchové mezery mezi rotorem a statorem. Je to statická excentricita. Jako statickou excentricitu označujeme stav, kdy vzduchová mezera mezi rotorem a statorem elektrického motoru není po celém obvodu vrtání stroje konstantní, někde je větší někde menší, ale tato místa se v prostoru nepohybují. Takže se šířka vzduchové mezery nemění v prostoru (je závislá pouze na poloze) a není závislá na čase. Změny tloušťky vzduchové mezery by neměly přesáhnout 5% u asynchronních a 10 % u synchronních motorů. Statická excentricita může být dána výstředností statoru nebo jeho ovalitou. Rotující vzduchová mezera způsobí směrové vibrace. Největší magnetické síly se projevují u nejmenších mezer mezi rotorem a statorem. Statická excentricita se v proudovém spektru projevívá vznikem postranních pásem v okolí frekvence sítě. Jejich vzdálenost je dána počtem pólů daného asynchronního stroje a frekvencí sítě, ze které je stroj napájen. Amplitudy postranních frekvencí pak budou přímo úměrné velikosti excentricity.

6.1.2. Zkratované vinutí je problém izolace lamelových vrstev, které mohou způsobit lokální zahřívání, které může poničit stator nebo ohnout hřídel motoru. To způsobuje teplem indukované ohnutí, které může s operační dobou významně narůstat.

Tepelně způsobené vibrace mohou růst úměrně s časem běhu motoru. Z toho plynoucí případný styk statoru s rotorem by způsobil katastrofální následky.

6.1.3. Uvolnění (úbytek) kovu. K úbytku materiálu (kovu) může dojít právě díky poruchám stability. Povolení kovu je způsobeno lokálním povolením či uvolněním ve stojanu motoru.

6.2. Nesoustřednost rotoru

V případě výstředného rotoru není rotor samotný soustředný se svou střednicí. Proto výstředný rotor vytváří nerovnoměrnou vzduchovou mezeru mezi rotorem a statorem, která se pohybuje spolu s rotorem. Je to dynamická excentricita. Při dynamické excentricitě šířka vzduchové mezery není pouze funkcí polohy (jak v dříve uvedeném případě statické mezery), ale zároveň funkcí času. Příčinou výstředného rotoru mohou být ovalita rotoru nebo trvalá deformace od průhybu rotoru. Ukázka jak by tento problém mohl nastat: zkratované vinutí rotoru způsobí lokální ohřev a následné ohnutí rotoru.

Motor s výstředným rotorem bude často vykazovat zvyšující se vibrace se stoupající teplotou. Například po nastartování takového motoru poprvé, se mohou ukázat hodnoty hladiny pouze $0,10 \text{ in} \cdot \text{sec}^{-1}$. Ale po době 30 minut může dosáhnout $0,25 \text{ in} \cdot \text{sec}^{-1}$ i více. To může být způsobeno relativně nestejným zahříváním jedné strany rotoru vůči druhé straně. Pokud by nebyla zajištěna náprava, může se rotor prohnout natolik, že se dostane do samotného statoru, což by vedlo k havárii.

Pozornost by měla být věnována motorům, jejichž amplituda na dvojnásobku řádkového kmitočtu ($7200 \cdot \text{min}^{-1}$) překračuje přibližně $0,050 \text{ in} \cdot \text{sec}^{-1}$ u motorů za provozu.

Frekvencí průchodu pólů:

$$f_p = f_{SK} \cdot p_1 \quad (5)$$

$$f_{SK} = f_L \cdot SK \quad (6)$$

$$SK = \frac{f_L - p_1 \cdot f_r}{f_L} \quad (7)$$

Nesoustředný rotor způsobí rotující, měnící se vzduchovou mezeru, která indukuje pulsující vibrace (obvykle mezi $2F_L$ a nejbližším harmonickým kmitočtem provozní rychlosti). Proto, abychom oddělili $2F_L$ kmitočet a harmonické kmitočty provozní rychlosti, je třeba použít spektrální analýzu (zoom spectrum). Nesoustředný

rotor způsobí $2F_L$ kmitočet obklopený postranními pásmy s kmitočty pólové rychlosti (F_p). Obvyklé hodnoty F_p se pohybují v rozmezí od 20 do 120 cyklů za minutu (0,3 – 2,0 Hz) a se sami objevují na nízkém kmitočtu. Měkká patka a špatné doléhání často způsobují proměnlivou vzduchovou mezeru. Aby byla vzduchová mezera v mezích přípustnosti po celém obvodu, může výstředný rotor vyžadovat seřízení samotných těles ložisek anebo obrábění otočného čepu.

6.3. Jiné problémy rotoru

Je třeba věnovat pozornost amplitudám přesahujícím přibližně $0,06 \text{ in} \cdot \text{sec}^{-1}$ jak u kmitočtu průchodu tyčí rotoru tak u vyšších harmonických kmitočtů (2xRBPF nebo 3xRBPF). Interval postranního pásma v okolí RBPF a jeho harmonických kmitočtů bude přesně na dvojnásobku síťového kmitočtu ($2F_L$). Zvýší-li se rozsah frekvence na 2xRBPF, naleznou se amplitudy 10x nebo vícekrát vyšší než v RBPF. Důležité je nejdříve přesně detekovat existenci problému. Jestliže měření více sérií spektra neprokáže žádný skutečný nárůst, nedochází pravděpodobně k žádnému podstatnému poškození, dokonce i když budou hladiny RBPF přibližně na 0,1 až $0,15 \text{ in} \cdot \text{sec}^{-1}$. A naopak, pokud změny od jednoho měření k následujícím podstatně narostou, poukazuje to na prudké zhoršení podmínek, které vybízí k zásahu.

6.3.1 Zlomené/prasklé tyče rotoru nebo zkratovacího prstence.

K přerušení rotorových tyčí může dojít především u motorů s častým rozběhem, neboť zde dochází k velkému tepelnému namáhání vysokými rozběhovými proudy. Dále pak u motorů s těžkými rozběhy s připojeným mechanickým zatížením, i když nejsou zapínány často. Náchylnější k této poruše jsou motory s klecí z hliníku. Nejvíce je tato porucha nebezpečná v prostředích s možností výbuchu, neboť ve zlomu rotorové tyče dochází k jiskření.

Každá rotorová fáze je tvořena jednou tyčí, která je uložena v drážce a spojená na obou stranách čelními kruhy. V tyčích se indukují napětí, jenž vytváří symetrický vícefázový systém. Jednotlivé tyče nebo i části kruhu mohou mít z různých důvodů (výrobních, technologických, provozních) různé elektrické odpory. Krajním případem je pak přerušení jedné nebo několika tyčí, nebo i kruhu. Frekvence průchodu rotorových tyčí:

$$f_{RT} = n_{RT} \cdot n \quad (8)$$

Nesymetrie vinutí způsobí zhoršení provozních vlastností motoru. Jde zejména o zvýšení oteplení nepoškozené části vinutí, vznik parazitních momentů apod. Uvedená

nesymetrie se pak projeví deformací magnetického pole ve vzduchové mezeře a tím se změní i elektrické a magnetické veličiny. Charakteristickým je přítomnost postranních pásem kmitočtu průchodu póly kolem 1X ot./min. Postranní pásma vznikají téměř vždy, protože se málokdy podaří vyrobit motor se stejným odporem ve všech rotorových tyčích. Rozdíly jsou však malé a amplituda postranního pásma ve srovnání s amplitudou síťové frekvence je větší než 60 dB. Při přerušených (zlomených) rotorových tyčích se amplituda postranních pásem podstatně zvětšuje a to tím více, čím je větší počet přerušených rotorových tyčí a nacházejí-li se tyto tyče vedle sebe. Velikost postranních pásem okolo síťové frekvence je ovlivněna počtem přerušených tyčí a zatížením stroje. Na základě rozdílu mezi amplitudou síťové frekvence a amplitudou postranního pásma lze určit počet přerušených rotorových tyčí při plném zatížení:

$$n_1 \approx \frac{2 \cdot R}{10^{\frac{D}{20}} + 2 \cdot p} \quad (9)$$

Kde

n_1 - počet přerušených rotorových tyčí

R – počet rotorových drážek

D – decibelový rozdíl mezi amplitudami

p_1 – počet pólových dvojic

Rovnice se dá použít pouze pro motory, které pracují při plném zatížení. Jinak by se ještě počítal koeficient zatížení motoru pomocí skluzových otáček.

6.3.2. Drážkování.

Ve spektru proudu se rovněž vyskytují harmonické způsobené drážkováním rotoru. Je to způsobeno tím, že vzduchová mezera je jiná u drážky a jiná u zubu, proto není konstantní. Amplituda drážkových frekvencí není závislá ani na počtu přerušených rotorových tyčí ani na zatížení motoru, takže decibelový rozdíl je ve vztahu k zatížení konstantní.

6.3.3. Uvolněné/ otevřené tyče nemají zajištěný dobrý kontakt s koncovými prstenci. Chybějící, nebo otevřené tyče jsou indikovány okrajovým pásmem o 2x síťového kmitočtu ($2F_L$) obklopujícími kmitočty rychlosti tyčí rotoru a/nebo její harmonické frekvence. Elektricky způsobený ohyb mezi chybějícími tyči rotoru a prstencem bude nejčastěji vykazovat vysokou úroveň na 2xRBPF (s $2F_L$ okraji), ale malý nebo žádný vzestup na amplitudách okolo 1xRBPF. Amplitudy RBPF nebo jejich harmonické kmity nikdy nebudou nejvyššími amplitudami. Nejvyšší by místo nich

mohlo být jedno z postranních pásem v intervalech na různých frekvencích $2x$ síťového kmitočtu (obvykle $7200 \text{ cyklů} \cdot \text{min}^{-1}$ s $60 \text{ Hz } F_L$). Tato oblast kmitočtů bude nicméně zahrnovat RBPF a postranní pásma přesného $2 F_L$, a bude stále naznačovat uvolněné či otevřené tyče rotoru a/nebo proměnlivou vzduchovou mezeru.

6.4. Problémy s fázováním.

Problémy s fázováním, způsobené chybějícími, nebo ztracenými konektory motoru mohou zapříčinit neobvyklé vibrace na $2 F_L$, která bude mít okraje okolo $1/3$ síťového kmitočtu ($1/3 F_L$). Úrovně okolo $2 F_L$ mohou dosahovat $1,0$, jestli zůstanou neopraveny. Problém je taky v tom, že vadný konektor zprostředkuje kontakt jenom občas. Ztracené nebo rozbité konektory musí být opraveny, aby se předešlo katastrofickým selháním.

6.5. Problémy pulsace točivého momentu

U elektrických motorů se z důvodu pulsace točivého momentu projevuje inherentní vibrace. Příčinou je rotující magnetické pole, které energizuje póly statoru. Obvykle je tato vibrace celkem nízká a bezproblémová. Samotná pulsace točivého momentu se objevuje na $2x$ síťového kmitočtu ($7200 \text{ cyklů} \cdot \text{min}^{-1}$ pro síťový kmitočet 60 Hz). Důvodem je fakt, že každý pól motoru je v podstatě energizován $2x$ během každého cyklu střídavého proudu.

Tento vibrační problém se vyskytuje velice zřídka, kromě těch případů, kdy je zapotřebí velmi nízké vibrace, jako například u obráběcích strojů, nebo pokud by pulzování točivého momentu mělo ve stroji (anebo v konstrukci) budit přirozené kmitočty kolem dvojnásobku síťového kmitočtu. Pulsace točivého momentu mohou budit uvolněné tyče motoru a uvolněné vinutí statoru na frekvencích $2x$, $3x$ a dokonce i $4x$ kmitočtu pulsace točivého momentu (nebo 14400 , 21600 a $28800 \text{ cyklů} \cdot \text{min}^{-1}$)

6.6. Mechanické závady elektromotorů

Ve většině případů mechanické defekty (zejména defekty ložisek) nejsou prvotní příčinou problému. Obvykle bývají defekty ložisek následkem existence nějaké jiné závady stroje. Pokud se zjistí že ložisko je poškozené, mělo by se hledat další příznaky závady jako je nesouosost nebo nevyváženost a provádí se oprava poškozených ložisek spolu s odstraněním příčin jejich poškození.

6.6.1 Nesouosost – vadné ustavení motoru vzhledem k poháněnému zařízení. Nesouosost vyvolává ve spojení motoru s poháněným zařízením deformační a třecí síly, které mohou deformovat ložiskový uzel i samotný rotor. V takovémto případě bývá při

analýze magnetického pole zřetelně vyjádřeno postranní pásmo otáčkové frekvence, tj. Ve frekvenčním spektru rozptylového magnetického pole bude vyjádřena frekvence vzdálená od f_1 o $\pm \frac{n}{60}$.

Nesouosost hřídelí, které jsou spojeny tuhým nebo pružným spojením téměř vždy vyvolává poruchu ložiska. Ta se projeví ve vibračním spektru na frekvenční složce odpovídající dvojnásobku otáčkové frekvence. Druhá harmonická frekvence otáček je často větší než první harmonická frekvence otáček. Nesouosé ložisko je například křivě nasazené ložisko. Nesouosost je rovněž zdrojem torzního kmitání.

Rozeznáváme úhlovou nesouosost, která vyvolává axiální vibrace fázově navzájem posunuté přes spojku o 180° . Typická je složka na frekvenci shodné s otáčkovou frekvencí, ale nejsou výjimečné další harmonické složky. Potom paralelní (rovnoběžná) nesouosost, která má za následek velké radiální vibrace na dvojnásobku otáčkové frekvence, přičemž její amplituda bývá větší než u základní složky. A kombinovanou nesouosost, která je kombinací předchozích dvou vadných ustavení motoru.

6.6.2. Nevývaha.

Nevývahou se rozumí posunuté těžiště stroje a je reprezentovaná nerovnoměrným rozložením hmoty točivých částí stroje okolo jeho osy otáčení, přičemž hlavní osa setrvačnosti se neshoduje s osou rotace. Rotující nevyvážené součásti vyvolávají volné odstředivé síly, jejichž frekvence je totožná s počtem otáček. Tyto síly jsou příčinou vibrací ložisek, strojů, jejich základů atd. Důsledkem takto vyvolaného kmitání je poškození motoru, snížení životnosti atd.

Rozeznáváme nevývahu statickou, momentovou a dynamickou. V praxi se prakticky nevyskytuje nevývaha statická (osa rotace je rovnoběžná s osou setrvačnosti) a nevývaha momentová (osa rotace není rovnoběžná s osou setrvačnosti, ale těžiště je na ose setrvačnosti). Nejčastějším typem je nevývaha dynamická, která způsobuje vznik vibrací stroje na frekvenci shodné s jeho otáčkovou frekvencí a obvykle i na dvojnásobku této frekvence. Jak v axiálním (reprezentuje měření vibrací ve směru osy hřídele), tak i v radiálním směru (ve směru kolmém k ose hřídele), přičemž převládají vibrace v radiálním směru. Amplituda složek vibrací roste s kvadrátem otáček.

6.6.3. Mechanické vůle. Mezi zdroje kmitů patří mechanické vůle (například uvolnění kotvících šroubů, vůle ložiska v domku atd.), strukturální vůle a deformace základů, které při uvolnění generují násobky (až do dvacetinásobku) harmonických

složek otáčkové frekvence. Vibrace jsou převážně v radiálním směru, ale jsou často silně směrově závislé v oblasti $\pm 30^\circ$.

6.6.4. Trhlinu v hřídeli lze detekovat při rozběhu nebo doběhu na základě amplitudy a fáze spektrálních složek při základní a dvojnásobné otáčkové frekvenci.

6.7. Poruchy ložisek

U ložisek dochází povrchovou únavou materiálu ložiskových elementů k vydrolování materiálu povrchové vrstvy (tzv. pitting), otěru s nárůstem vůle, korozi, rýhování, prohlubeninám a poruchám klece.

Vzhledem k odlišnému konstrukčnímu uspořádání ložisek je diagnostika ložisek rozdělena do dvou směrů: diagnostika kluzných ložisek a diagnostika valivých ložisek. Kluzná ložiska by teoreticky měla mít nekonečnou životnost protože se za provozu neopotřebovávají. S výjimkou výrobních poruch jsou poruchy ložisek vyvolány vnějšími silami, které vznikly například působením nevyváženého rotoru soustavy, kde jsou zabudována, nedostatečného mazání nebo za poruchy olejového filmu. Mezi příčiny lze také uvést i vliv nestability a elektrický výboj. Na rozdíl od kluzných ložisek prvky valivých ložisek mají konečnou dobu provozu a mohou se u nich vyskytnout poruchy vyvolané únavou materiálu i bez přítomnosti nadměrných vnějších sil.

Poruchy valivých ložisek obvykle začínají trhlinkou nebo důlkem v jednom z prvků ložiska, tj. na vnějším či vnitřním kroužku nebo kuličce (válečku). V počáteční fázi opotřebení ložiska s povrchovými defekty o rozměrech řádově mikrometrů se nárazy při kontaktu kov-kov tělesem ložiska šíří akustická emise ve frekvencích až do několika megahertzů (MHz). V druhé fázi poškození ložiska již dochází k poškození jednotlivých elementů, ale vibrační spektrální složky odpovídající nízkým kinematickým frekvencím jsou zcela maskovány nízkofrekvenčními spektrálními složkami. Z toho důvodu se diagnostika ložiska v této fázi poškození provádí ve frekvenčním ultrazvukovém pásmu v rozmezí 20 kilohertzů (kHz) – 60 kHz. Ve třetí fázi poškozený prvek vyvolává při pohybu stykem s dalším prvkem mechanické rázy, při nichž dochází k přenosu kinetické energie na těleso ložiska. Těleso ložiska se rozkmitá a frekvence kmitů bývá 5 – 20 kHz, přičemž kmity jsou tlumené a rychle doznívají. V další fázi značného a obvykle již kritického poškození elementů ložiska lze již registrovat vibrační spektrální složky přímo v oblasti nízkých kmitočtů. Dochází ale i k nárůstu otáčkových spektrálních složek.

Poruše vnějšího kroužku odpovídá frekvence:

$$f_o = \frac{n_{VT}}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d_T}{d_R} \cdot \cos\beta \right) \quad (10)$$

Poruše vnitřního kroužku odpovídá frekvence:

$$f_i = \frac{n_{VT}}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{d_T}{d_R} \cdot \cos\beta \right) \quad (11)$$

Poruše valivého tělíska odpovídá frekvence:

$$f_v = \frac{d_R}{d_T} \cdot f_r \cdot \left[1 - \left(\frac{d_T}{d_R} \cdot \cos\beta \right)^2 \right] \quad (12)$$

Poruše klece valivého ložiska odpovídá frekvence:

$$f_k = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d_T}{d_R} \cos\beta \right) \quad (13)$$

kde n_{VT} – počet valivých tělísek

f_R - relativní rychlost mezi vnitřním a vnějším kroužkem (rotorová frekvence)

d_T - průměr tělíska

d_R - rozteč tělíska (střední průměr ložiska)

β - kontaktní úhel dotyku

6.7.1. Ložiskové proudy.

Jednou z možných příčin poruch ložisek u elektrických strojů jsou ložiskové proudy. U elektrických strojů zvláště větších výkonů dochází ke vzniku hřídelových napětí dosti často a při nerespektování jistých projekčních a montážních závad i ke vzniku ložiskových proudů. Je-li ložisko vystaveno vlivu napětí, pak při překročení určitého gradientu dojde k průrazu dielektrické vrstvy - maziva - a k průtoku proudu. Při něm dochází k místnímu ohřevu, přenosu materiálu, deformaci kluzné plochy, ke změně struktury maziva a k postupné celkové degradaci ložiska.

U strojů napájených síťovým napětím se sinusovým průběhem jsou známy následující zdroje ložiskových napětí:

- Napětí způsobené nesymetriemi v magnetickém obvodu. Vzniká střídavé napětí se statorovou frekvencí. Může být způsobeno excentricitou rotoru, dělicími spárami mezi segmenty plechů statoru, nesouměrnými čely vinutí ve třech polohách,

nevhodně volenými axiálními ventilačními kanály, nestejnou permeabilitou magnetického materiálu apod.

- Napětí vzniklé podélnou magnetizací hřídele – axiální magnetické toky mohou být vyvolané například přesycením nebo zbytkovou magnetizací. V prostoru ložisek se indukují homopolární napětí, které není velké, avšak může vyvolat velké proudy. Ochranou může být demagnetizace zmagnetovaných částí, nebo přerušení cesty magnetického toku.

Prochází-li elektrický proud valivým ložiskem, dochází k elektrickým výbojům mezi oběžnými dráhami vnitřního a vnějšího kroužku a valivými tělesy. Výboje procházejí mazivem, například olejem, v němž se může objevit značné množství nezadíratelných i zadíratelných nečistot. Protože ložiska pracují vždy s olejovým filmem, musí v případě průchodu ložiskového proudu dojít k průrazu tohoto filmu.

Výboj způsobí lokální natavení, vznikne kráter o průměru 0,1 až 0,5 mm, který se ihned zakalí a tím se stane křehčí, než původní materiál. Vznik kráterů na oběžných dráhách vyvolá další typ mechanického poškození, tzv. rýhování. Příčinou jsou mechanické rezonanční kmity vyvolané dynamickým účinkem valivých těles poskakujících přes krátery. Toto poškození je tedy sekundární a vyvíjí se až po určitém čase po vzniku kráterů.

Ochranu ložisek lze zajistit několika způsoby. První způsob spočívá v izolování vnějšího kroužku. Nejnověji se izoluje vnitřní kroužek, což je výhodnější pro menší stykovou plochu a menší kapacitance ložiska. Izolaci tvoří plazmovou technologií nanesený povlak oxidu hliníku o tloušťce 100 mikrometrů (μm) až 300 μm . Tato vrstvička udrží napětí o hodnotě až 1000 voltů (V). Druhý způsob je dražší a spočívá v použití tzv. hybridních ložisek (ložiska s ocelovými kroužky a keramickými kuličkami). Tato ložiska zabrání průchodu proudu a udrží vysoké hodnoty napětí, kromě toho mají i další výborné vlastnosti ve srovnání s klasickými ložisky: jejich trvanlivost je mnohonásobně delší, mají o 60% menší hmotnost, tření a otěr jsou menší (lepší tribologické vlastnosti), mají nižší provozní teplotu při stejných otáčkách, výborný «studený start», vyšší statickou a dynamickou únosnost, mají mnohem lepší nouzové vlastnosti (nezadírají se při nedostatečném mazání), atd.

7. Postup pro měření vibrací elektromotorů.

Měření se provádí pomocí sondy firmy SKF a přístroje MICROLOG CMVA 10 (viz. obr. č.6). Analyzátor Microlog CMVA 10 je přenosný přístroj (váží jenom 2,04 kg) pro sběr a ukládání dat, který se používá pro monitorování stavu strojů pomocí vibrační a tepelné diagnostiky. Zkoušení může být prováděno on-line (nebo-li in situ) bez přerušení provozu stroje. Provádí se frekvenční dynamická analýza pomocí FFT, obrazovka je schopna ukázat amplitudové spektrum, fázové spektrum a časový průběh změřeného signálu. U Micrologu se používají tři druhy průměrování: aritmetické, časově synchronní a průměrování indikace maximální špičkové hodnoty během měření. Pro sběr dat při měření vibrací se používá připojení snímačů zrychlení nebo rychlosti, například piezoelektrický akcelerometr SKF nebo sonda pro ruční měření. Pro přenos dat do počítače a nabíjení baterie se používá podpůrný modul. Během použití je možnost programování citlivosti snímače a jednotek zvlášť pro každé měření, dodání slovního popisu a automatické ukládání časových dat. Rozsah frekvence je od 0 až do 20000 Hz, frekvenční přesnost je 0,01 %, amplitudová přesnost je 1 % u jednotlivé frekvence.



Obr. 6. Analyzátor MICROLOG CMVA 10 a sonda SKF

Pro měření jsou vybrány 4 elektromotory, které jsou běžně používané pro pohon pomocného zařízení v laboratoři katedry KVM. Celý postup rozdělím na tři hlavní části:

Fáze přípravování:

1. Uložit zkoušený stroj do pracovní polohy. Připravit měřicí přístroj pro měření (zkontrolovat jeho stav, nastavení, filtry apod.)

S ohledem na to, že experiment se prováděl přímo na «pracovišti zkoušených strojů» demontáž elektromotorů považují za zbytečný. Zkoušené stroje zůstaly v běžné provozní poloze s připojeným zatěžujícím zařízením, čímž se dalo vyhnout nežádoucímu zásahu a ušetřit čas.

2. Zjistit typ a parametry motoru, jmenovité hodnoty. K tomu slouží štítek, který by každý motor měl obsahovat přímo na krytu a nebo v jeho blízkosti.

3. Jiné potřebné parametry (jako jsou například technické údaje) lze zjistit v technickém pasu, technické kartě, předpisů, návodu na obsluhu a použití a nebo jiné technické dokumentace k elektromotoru, která je nezbytnou částí elektromotorů podle zákona. Případně z katalogů firmy výrobce daného elektromotoru

4. Pomocí zjištěných hodnot a podle uvedených hodnot v této práci vypočítáme frekvenci potenciálních vad, které ve zkoušeném stroji mohou nastat.

Fáze měření:

5. Zapnout zkoušený stroj (v případě že není již v provozu). Měření se provádí po rozběhu stroje do ustáleného chodu a při dodržení jmenovitých hodnot strojem, což se pravidelně kontroluje.

6. Připojit sondu do vhodného měřicího místa. Pokud vybrané místo pro měření má překážky pro připojení (nerovnosti povrchu, odrazivý materiál, sklon) a sonda se na tom nemůže udržet samostatně, je vhodné jí přidržet (přitlačit) rukou.

7. Začíná se měření. Na obrazovce přístroje vznikají spektra vibrací, které stroj vykazuje. Naměřený průběh ve tvaru spektra lze uložit do paměti měřicího přístroje pro další zpracování. Doporučuji ihned po měření udělat poznámky měřicího místa a směru každého bodu pro možnosti hodnocení a analýzy spekter vibrací, které se v tomto bodě objevili.

8. Vypnout zkoušený stroj (v případě nutnosti) a měřicí přístroj. Sbíraná data se ukládají do počítačového softwarového programu.

Fáze hodnocení:

9. Použitím znalostí o projevech vad, vypočtených frekvencích potenciálních vad, skutečných průběhů vibračních spekter a přípustných hodnot stanovených ISO ČSN (a nebo EN ČSN), hodnotím skutečný stav elektromotoru. Pokud veškeré naměřené hodnoty odpovídají příslušným přípustným hodnotám, stav elektromotoru se považuje za uspokojivý. Pokud některé hodnoty neodpovídají příslušným předepsaným hodnotám, stav elektromotoru se považuje za neuspokojivý, rozhoduje se v čem je problém, vyhledávám poruchu, snažím se ji odstranit buď opravou a nebo výměnou poškozené součásti.

10. Výsledky se zanášejí do protokolu.

Doporučuji vzít v úvahu příčiny vzniku daného poškození pro možnost uniknutí podobných poruch v budoucnu.

8. Příklady měření vibrací.

8.1 Elektromotor 1LA7106-6AA-10z firmy SIEMENS.

Popis: trojfázový asynchronní motor s vodorovnou osou a s kotvou nakrátko, patkový, řízený frekvenčním měničem, chlazený radiálním ventilátorem a žebry.

Druh připojeného zatěžujícího zařízení: klimatizace, vzduchotechnika.

Použitím katalogu firmy SIEMENS a štítku na kostře elektromotoru jsou zjištěné následující parametry, uvedené v tabulce č. 7.

Tab. 7. Údaje o motoru 1LA7106-6AA-10z

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	1,5	kW
Otáčky	925	min^{-1}
Napětí	230/400	V
Frekvence	50	Hz
Počet pólů	6	–
Krytí	IP55	–
Kostra	Hliníková	–
Třída izolace	F	–
Velikost (osová výška)	100	mm
Ložiska: Strana pohonu	Ložisko 6206 ČSN 02 4630	
Ložiska: Strana ventilátoru	Ložisko 6205 ČSN 02 4630	
Hladina akustického výkonu L_{WA} při chodu naprázdno	60	dB

Ze strojírenských tabulek a pomoci diabase dílů ATLAS.DB mnou byly zjištěné následující potřebné veličiny:

Strana pohonu: 6206

Počet řad: 1

Vnější průměr ložiska: $D = 62 \text{ mm}$

Vnitřní průměr ložiska: $d = 30 \text{ mm}$

Střední průměr ložiska: $d_R = 46 \text{ mm}$

Šířka ložiska: $B = 16 \text{ mm}$

Počet tělísk ložiska: $n_{VT} = 9 \text{ ks}$

Průměr tělísk ložiska: $d_T = 9,52 \text{ mm}$

Kontaktní úhel: $\beta = 0^\circ$

Strana ventilátoru: 6205

Počet řad: 1

Vnější průměr ložiska: $D = 52 \text{ mm}$

Vnitřní průměr ložiska: $d = 25 \text{ mm}$

Střední průměr ložiska: $d_R = 39,04 \text{ mm}$

Šířka ložiska: $B = 15 \text{ mm}$

Počet tělísk ložiska: $n_{VT} = 9 \text{ ks}$

Průměr tělísk ložiska: $d_T = 7,94 \text{ mm}$

Kontaktní úhel: $\beta = 0^\circ$

Vypočet frekvenci potenciálních poruch elektromotoru

$$\text{Frekvence rotoru: } f_R = \frac{n}{60}; f_R = \frac{3000}{60} = 50 \text{ [Hz]}$$

$$\text{Frekvence excentrického statoru } F_s = 2 \cdot 50; F_s = 100 \text{ [Hz]}$$

$$\text{Frekvence průchodů pólů } f_p = (f_L - p \cdot f_R) \cdot p_1 \quad (5), (6), (7).$$

$$|f_p| = |(50 - 6 \cdot 50)| \cdot 6 = 1500 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruch ložisek: strana pohonu.

Frekvence poruchy vnějšího kroužku

$$f_o = \frac{9}{2} \cdot 50 \cdot \left(1 - \frac{9,52}{46} \cdot \cos 0\right) = 178,43 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy vnitřního kroužku

$$f_i = \frac{9}{2} \cdot 50 \cdot \left(1 + \frac{9,52}{46} \cdot \cos 0\right) = 271,56 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy valivého tělíska

$$f_v = \frac{46}{9,52} \cdot 50 \cdot \left[1 - \left(\frac{9,52}{46} \cdot \cos 0\right)^2\right] = 231,25 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy klece valivého ložiska

$$f_k = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot \left(1 - \frac{9,52}{46} \cdot \cos 0\right) = 19,826 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruch ložisek : strana ventilátoru.

Frekvence poruchy vnějšího kroužku

$$f_o = \frac{9}{2} \cdot 50 \cdot \left(1 - \frac{7,94}{39,04} \cdot \cos 0\right) = 179,24 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy vnitřního kroužku

$$f_i = \frac{9}{2} \cdot 50 \cdot \left(1 + \frac{7,94}{39,04} \cdot \cos 0\right) = 270,76 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy valivého tělíska

$$f_v = \frac{39,04}{7,94} \cdot 50 \cdot \left[1 - \left(\frac{7,94}{39,04} \cdot \cos 0\right)^2\right] = 235,675 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy klece valivého ložiska

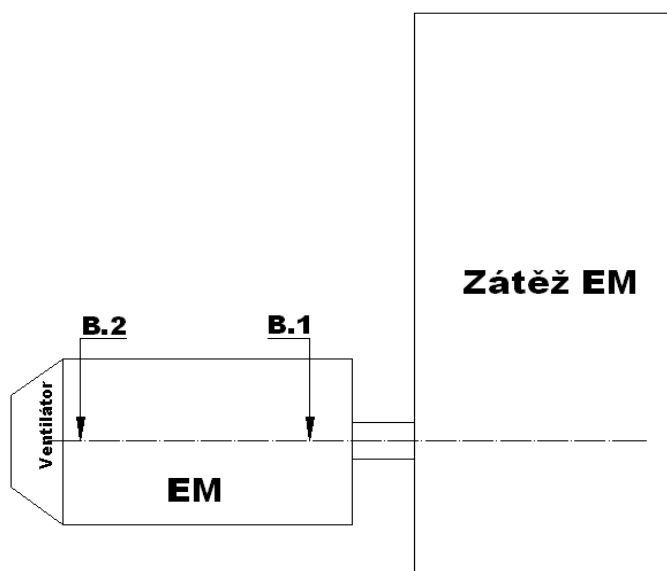
$$f_k = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot \left(1 - \frac{7,94}{39,04} \cdot \cos 0\right) = 19,915 \text{ [Hz]}$$

Popis experimentu:

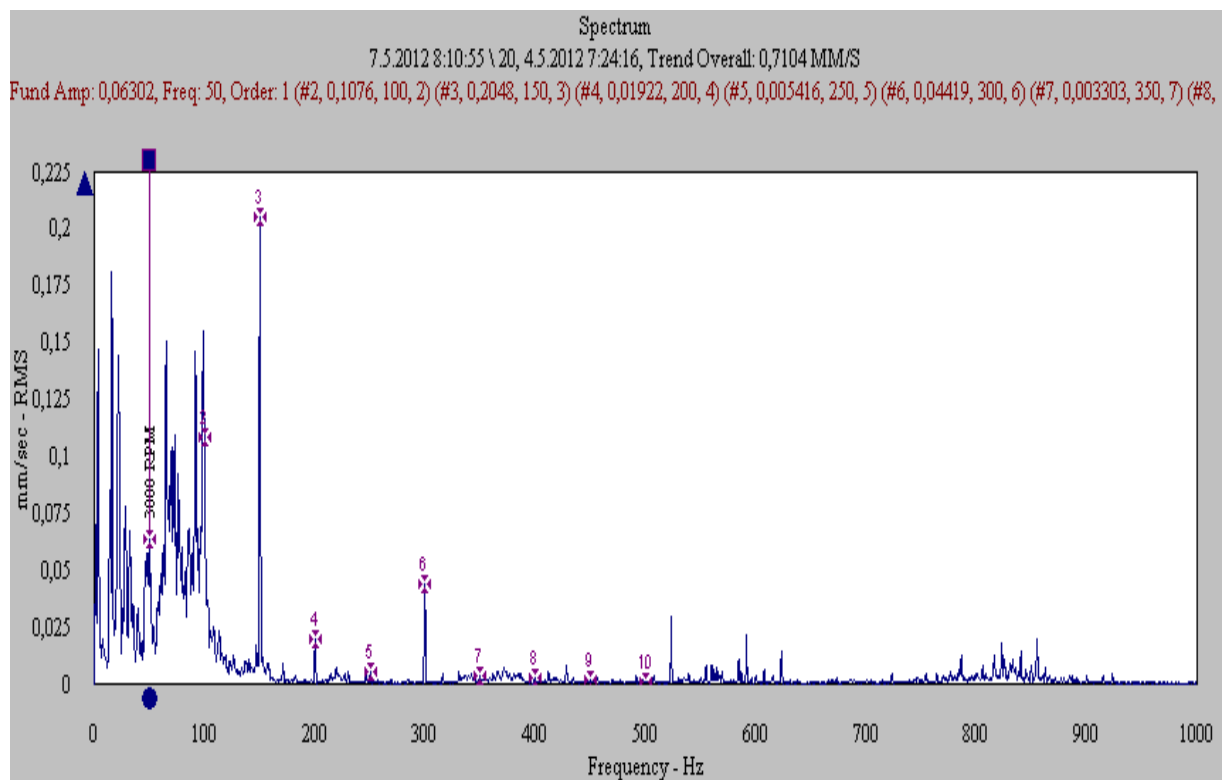
Zapnutí stroje. Pomoci regulaci frekvenčním měničem se zkoušený motor dostává na hodnoty jmenovité. Rozběh stroje na potřebné otáčky (počet otáček je $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$) trvá cca 120 s. Doba čekání na ustálený chod je cca 80 s. Sonda je umístěna na ložiska pro měření podle obrázků 7 a 8. Měření provádím vertikálním směrem. Během zkoušky motor se výrazně neohříval, byl přítomný velký hluk zatěžovacího zařízení.



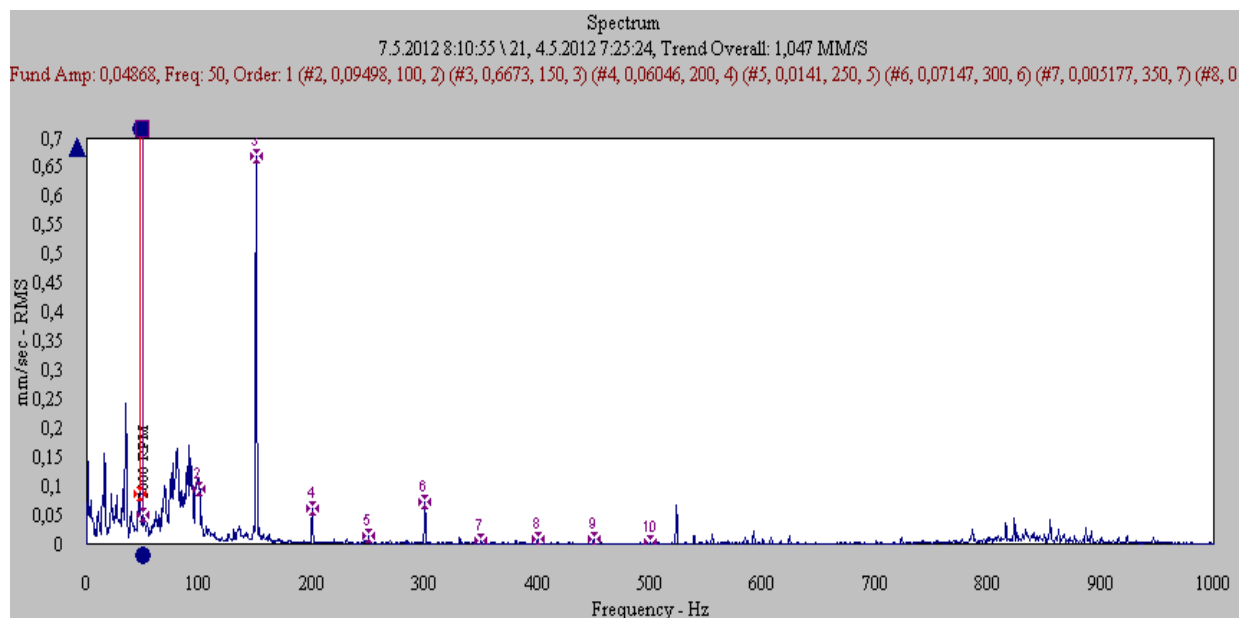
Obr. 7. Měření vibrací elektromotoru 1LA7106-6AA-10z v bodě 1



Obr. 8. Schéma měřicích bodů pro měření vibrací elektromotoru 1LA7106-6AA (horní pohled)



Obr. 9. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru ventilátoru Siemens ve vertikálním směru v bodě 1



Obr. 10. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru ventilátoru Siemens ve vertikálním směru v bodě 2

Tab. 8. Naměřené hodnoty pro elektromotor 1LA7106-6AA-10z

	Frekvence, Hz	Amplituda, $mm \cdot s^{-1}$	Efektivní rychlost, $mm \cdot s^{-1}$
Bod 1	50	0,063	0,7104
Bod 2	50	0,049	1,047

Výsledek: Softwarový program demonstuje přímo efektivní hodnotu rychlosti vibrací, stejně jak jsou uvedené v ČSN EN 60034-14. Proto není potřeba provádět jakýkoli přepočet hodnot pro posouzení v daném případě. Přípustné hodnoty pro elektromotor s výškou osy $H = 100mm$ při pevném uložení a normálním stupni posouzení podle tab. 3 jsou: amplituda $21\mu m = 0,021mm$, efektivní rychlost $1,3mm \cdot s^{-1}$, zrychlení $2,0 mm \cdot s^{-2}$. Hodnoty naměřené efektivní rychlostí v obou bodech nepřekračují přípustné.

Vibrace v bodě 1 (ložisko ze strany pohonu, V-směr) je 54,65 % dovolené hodnoty. Takový stav je považován za dobrý. Vibrace v bodě 2 (ložisko u ventilátoru, V-směr) je 80,54 % dovolené hodnoty. Takový stav lze považovat za uspokojivý, ale je vidět, že ložisko se zvýšeně (větší rychlosti) opotřebovává. Pokud nebude zjištěna a odstraněna příčina, k jeho výměně by mělo dojít dříve než u ložiska ze strany pohonu a jeho stavu v dynamice by měla být věnována vyšší pozornost.

Na spektrech jsou vidět i harmonické složky, přičemž třetí harmonická složka má maximální hodnotu na obou spektrech, a druhá je větší než první. Předpokládám projev mechanických problémů (například nesouosost).

8.2 Elektromotor AIR 160S8/4 firmy MEZ

Popis: trojfázový asynchronní motor s vodorovnou osou, patkový, chlazený radiálním ventilátorem a žebry.

Druh připojeného zatěžujícího zařízení: odsávací ventilátor.

Použitím katalogu firmy MEZ a štítku na kostře elektromotoru jsou zjištěné následující parametry, uvedené v tabulce č. 9.:

Tab. 9. Údaje o motoru AIR 160S8/4

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	6,0	kW
Otáčky	730	min ⁻¹
Napětí	380	V
Účinnost	0,81	–
Frekvence	50	Hz
Počet pólů	8/4	–
Výška osy	160	mm
Váha	86,9	kg
Kostra	Hliníková	–
Třída izolace	F	–
Rok výroby	1966	
Ložiska:	Ložisko 6009 ČSN 02 4630	

Ze strojírenských tabulek a pomoci databáze dílů ATLAS.DB mnou byly zjištěné následující potřebné veličiny:

Vnější průměr ložiska:	$D = 75 \text{ mm}$
Vnitřní průměr ložiska:	$d = 45 \text{ mm}$
Střední průměr ložiska :	$d_R = 60 \text{ mm}$
Šířka ložiska:	$B = 16 \text{ mm}$
Počet tělísek ložiska:	$n_{VT} = 13 \text{ ks}$
Průměr tělísek ložiska:	$d_T = 8,73 \text{ mm}$
Kontaktní úhel:	$\beta = 0^\circ$

$$\text{Frekvence rotoru: } f_R = \frac{n}{60}; f_R = \frac{730}{60} = 12,167 \text{ [Hz]}$$

Vypočet frekvenci potenciálních poruch elektromotoru

$$\text{Frekvence excentrického statoru } F_s = 2 \cdot 50; F_s = 100 \text{ [Hz]}$$

$$\text{Frekvence průchodů pólů } f_p = (f_L - p \cdot f_R) \cdot p_1 \quad (5), (6), (7).$$

$$|f_p| = |(50 - 8 \cdot 12,167)| \cdot 8 = 378,7 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruch ložisek:

Frekvence poruchy vnějšího kroužku

$$f_o = \frac{13}{2} \cdot 12,167 \cdot \left(1 - \frac{8,73}{60} \cdot \cos 0\right) = 67,578 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy vnitřního kroužku

$$f_i = \frac{13}{2} \cdot 12,167 \cdot \left(1 + \frac{8,73}{60} \cdot \cos 0\right) = 90,59 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy valivého tělíska

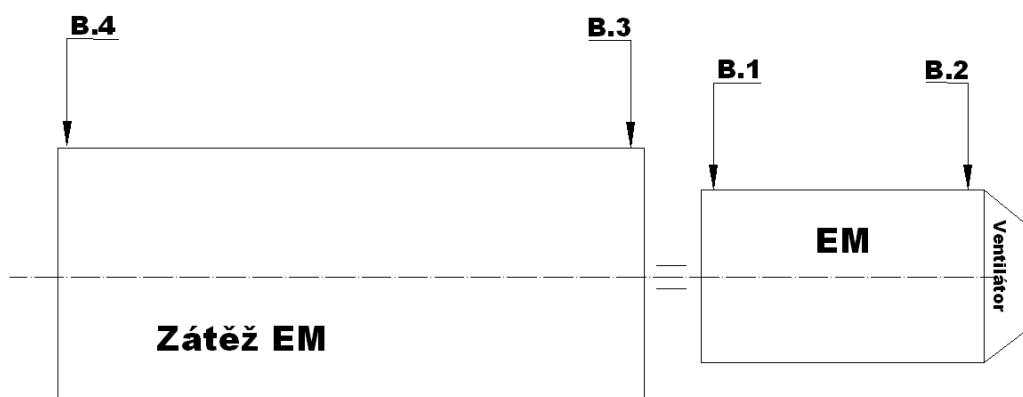
$$f_v = \frac{60}{8,73} \cdot 12,167 \cdot \left[1 - \left(\frac{8,73}{60} \cdot \cos 0\right)^2\right] = 81,85 \text{ [Hz]}$$

Frekvence poruchy klece valivého ložiska

$$f_k = \frac{1}{2} \cdot 12,167 \cdot \left(1 - \frac{8,73}{60} \cdot \cos 0\right) = 5,20 \text{ [Hz]}$$

Popis experimentu: Během zkoušky elektromotor pracoval se zapojením na 8 pólů.

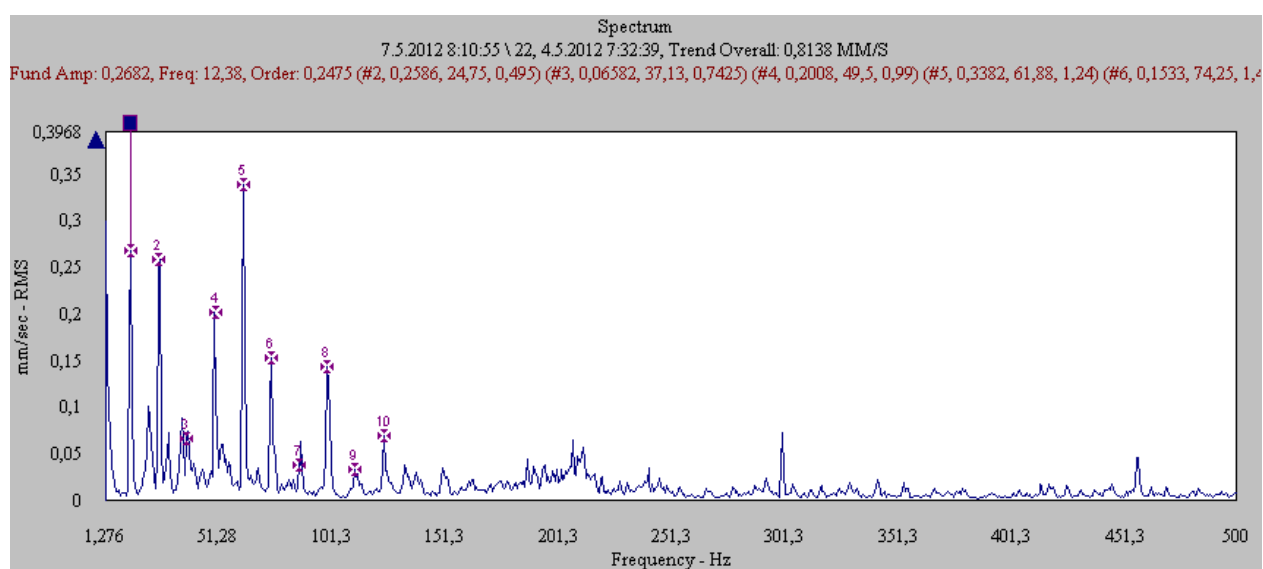
Provádím měření ve čtyř bodech jak je znázorněno na schematickém obrázku 11 a obrázku 12. Měření jsou ve vertikálním směru.



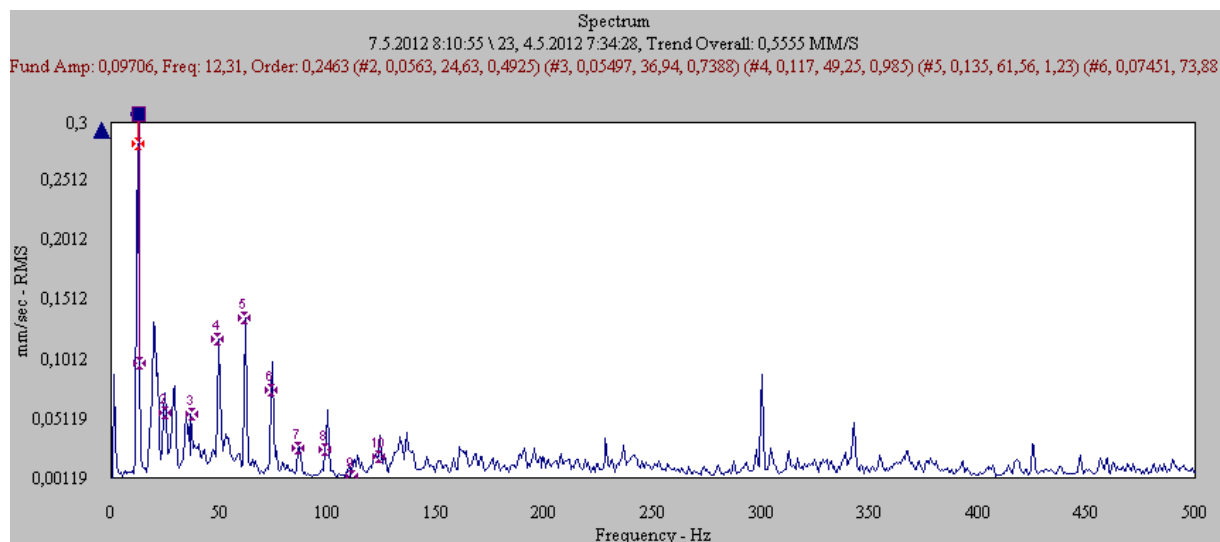
Obr. 11. Schéma měřicích bodů pro měření vibrací elektromotoru AIR160S8/4 (boční pohled)



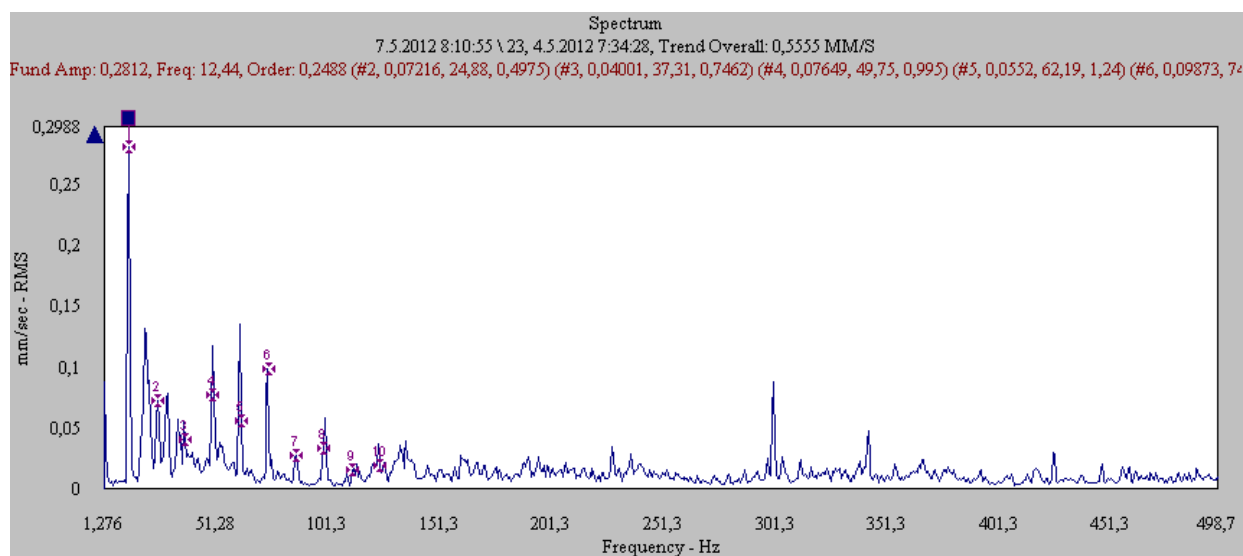
Obr. 12. Měření vibrací elektromotoru AIR 160S8/4



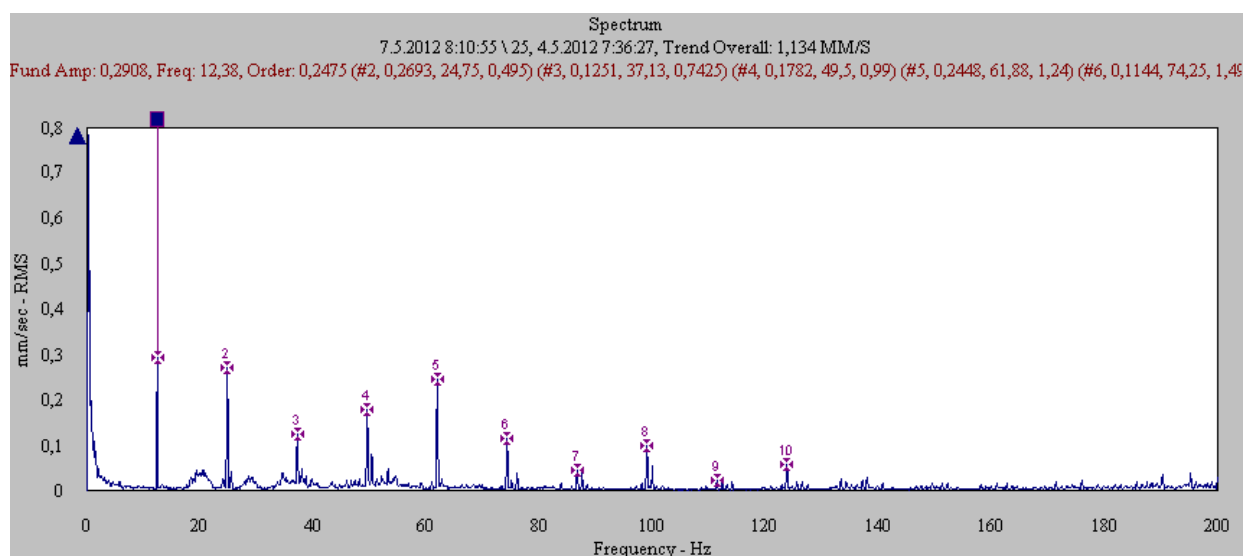
Obr. 13. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru ventilátoru AIR 160S8/4 firmy MEZ ve vertikálním směru v bodě 1.



Obr. 14. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru ventilátoru AIR 160S8/4 firmy MEZ ve vertikálním směru v bodě 2.



Obr. 15. Spektrum rychlosti vibrací ventilátoru AIR 160S8/4 firmy MEZ ve vertikálním směru v bodě 3.



Obr. 16. Spektrum rychlosti vibrací ventilátoru AIR 160S8/4 firmy MEZ ve vertikálním směru v bodě 4.

Tab. 10. Hodnoty vibrací pro elektromotor AIR 160S8/4:

	Frekvence, Hz	Amplituda, $mm \cdot s^{-1}$	Efektivní rychlost, $mm \cdot s^{-1}$
Bod 1	12,38	0,268	0,813
Bod 2	12,31	0,097	0,556
Bod 3	12,5	0,281	0,556
Bod 4	12,38	0,29	1,134

Výsledek:

Přípustné efektivní hodnoty pro elektromotor s výškou osy $H = 160\text{ mm}$ při pevném uložení a normálním stupni posouzení podle tab. 2 nebo tab. 3 jsou: amplituda

$29\text{ }\mu\text{m} = 0,029\text{ mm}$, rychlost $1,8\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, zrychlení $2,8\text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$.

Vibrace v bodě 1 je 45,17 % povolené hodnoty. Vibrace v bodech 2 a 3 jsou 30,89 % povolené hodnoty. Dobrý stav.

Vibrace v bodě 4 je 62,78 % povolené hodnoty. Uspokojivý stav. Ložisko vyžaduje dynamické analýzy a zmenšení doby mezi pravidelnými prohlídkami.

Na všech spektrech jsou harmonické složky s dost významnou amplitudou. Předpokladem je vznik mechanických problémů uvnitř zatěžujícího zařízení. Jinak sám elektromotor je v dobrém stavu a je v ose s pohaněným zařízením.

8.3 Elektromotor Frézky Typ OR57

Popis: trojfázový asynchronní motor s vodorovnou osou, je částí frézky, chlazený radiálním ventilátorem a žebry.

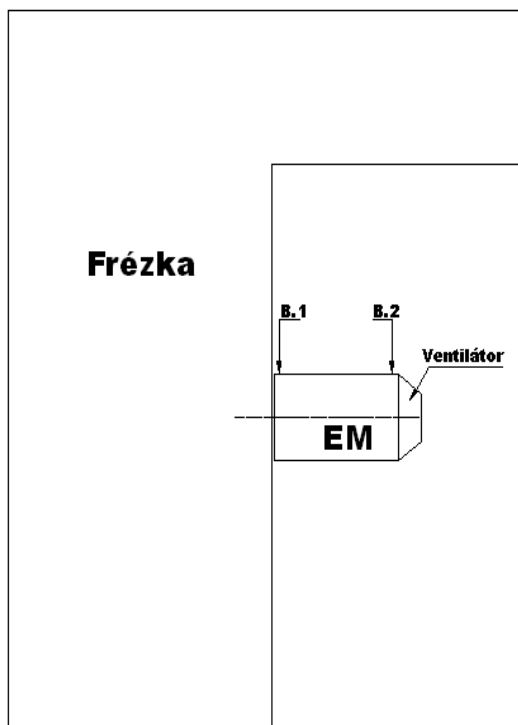
Druh připojeného zatěžujícího zařízení: činnosti souvisící s frézováním.

Použitím katalogu firmy MEZ a štítku na kostře elektromotoru jsou zjištěné následující parametry, uvedené v tabulce č. 11.

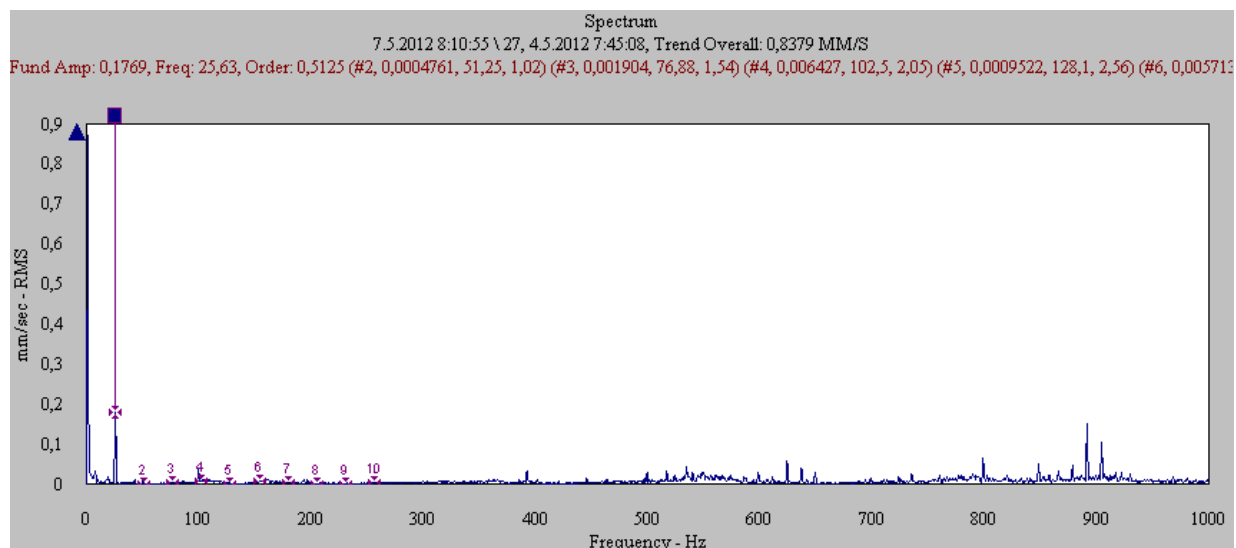
Tab. 11. Údaje o motoru OR57

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	4,4	kW
Otáčky	1440	min ⁻¹
Napětí	380/220	V
Frekvence	50	Hz
Třída izolace	FG	–
Rok výroby	1964	

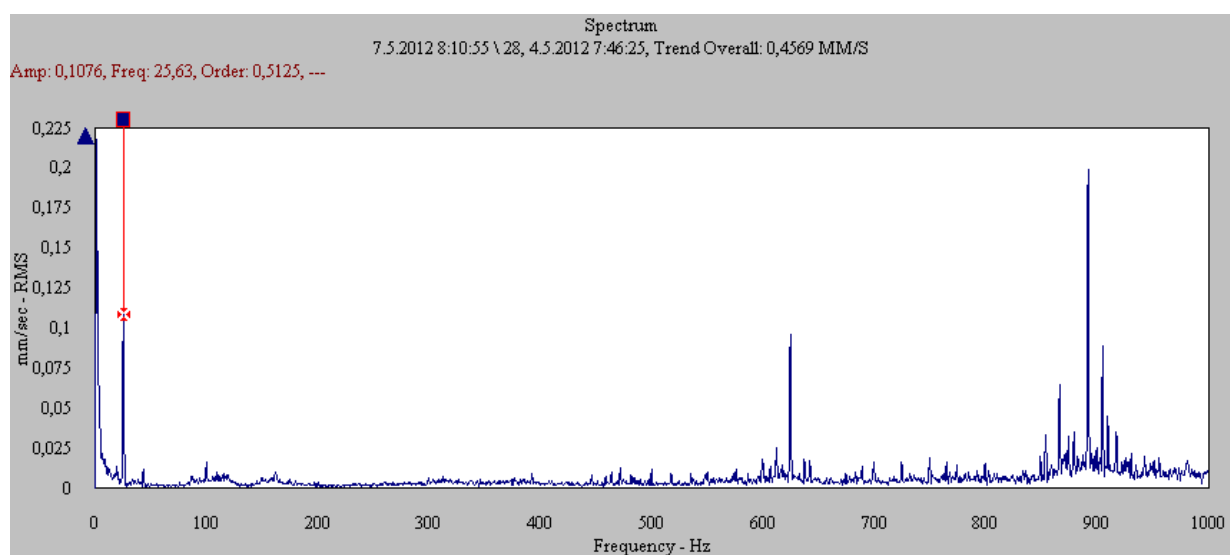
Popis experimentu: Měření se provádí stejnou metodou, jak je popsáno ve dvou předchozích případech. Měřicí body jsou na schematickém obrázku, měření ve vertikálním směru (viz. obr. č.17).



Obr. 17. Měření vibrací elektromotoru OR57



Obr. 18. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru Frézky Typ OR57 ve vertikálním směru v bodě 1.



Obr. 19. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru Frézky Typ OR57 ve vertikálním směru v bodě 2.

Tab. 12. Hodnoty vibrací elektromotoru OR57 :

	Frekvence, Hz	Amplituda, $mm \cdot s^{-1}$	Efektivní rychlost, $mm \cdot s^{-1}$
Bod 1	25,63	0,177	0,838
Bod 2	25,63	0,108	1,457

Výsledek: Přípustné efektivní hodnoty pro elektromotor s výškou osy $56 \leq H \leq 132$ při pevném uložení a normálním stupni posouzení podle tab. 3 jsou: amplituda $21 \mu m = 0,021 mm$, efektivní rychlost $1,3 mm \cdot s^{-1}$, zrychlení $2,0 mm \cdot s^{-2}$. Hodnota naměřené efektivní rychlosti v bodě 1 nepřekračuje přípustnou. Vibrace v bodě 1 (ložisko ze strany pohonu, V-směr) je 64,46 % dovolené hodnoty. Takový stav je považován za uspokojivý.

Efektivní hodnota rychlosti vibrace v bodě 2 překračuje přípustnou hodnotu. Vibrace v bodě 2 (ložisko u ventilátoru, V-směr) je 112,08 % dovolené, což znamená, že ložisko je v havarijním stavu. Stroj by měl být ihned vyloučen z provozu a opraven (odhad příčin, výměna poškozeného ložiska). Další využívání stroje může přivést k závažnějším poruchám jiných částí stroje.

Na spektru jsou harmonické složky, ale jejich amplituda není závazná. Takže tento projev by měl být sledován v dynamice.

8.4 Elektromotor brusky typu B 175-04 firmy ELKO

Popis: trojfázový asynchronní motor s vodorovnou osou, je částí brousky, je uvnitř a proto nejsou údaje o jeho tvaru (geometrie, kinematika).

Druh připojeného zatěžujícího zařízení: činnosti souvisící s broušením

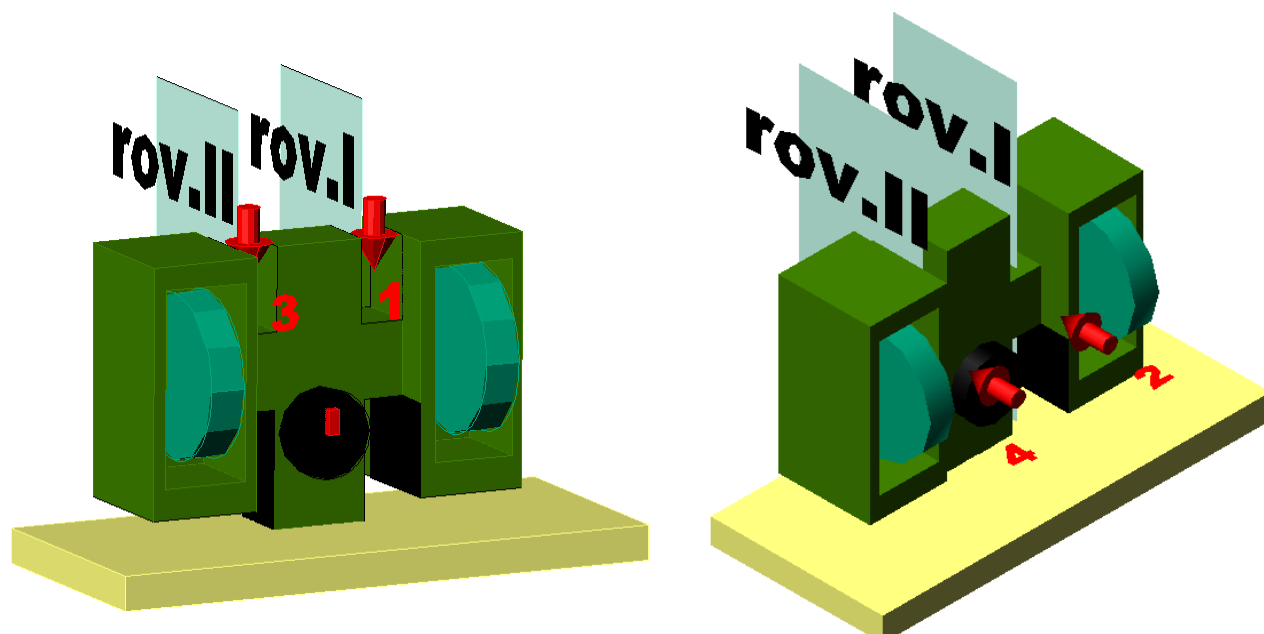
Použitím štítku na kostře brousky jsou zjištěné následující parametry, uvedené v tabulce č. 13.

Tab. 13. Údaje o motoru B175-04

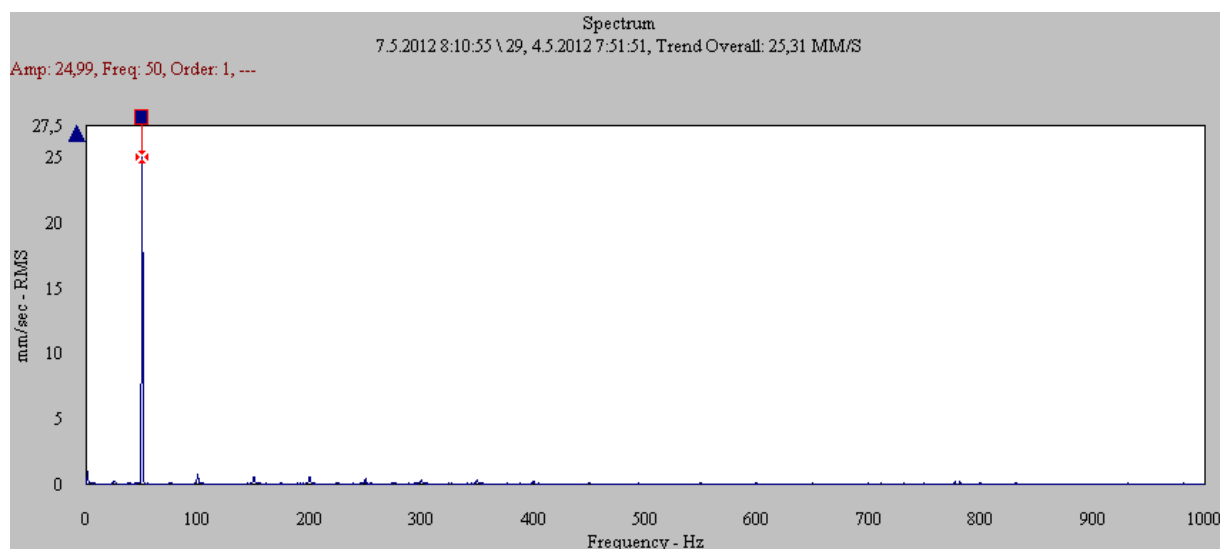
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	680/780	W
Otáčky	1400/2300	min^{-1}
Napětí	380/220	V
Frekvence	50	Hz

Otáčky jsou uvedené pro dvě možné režii.

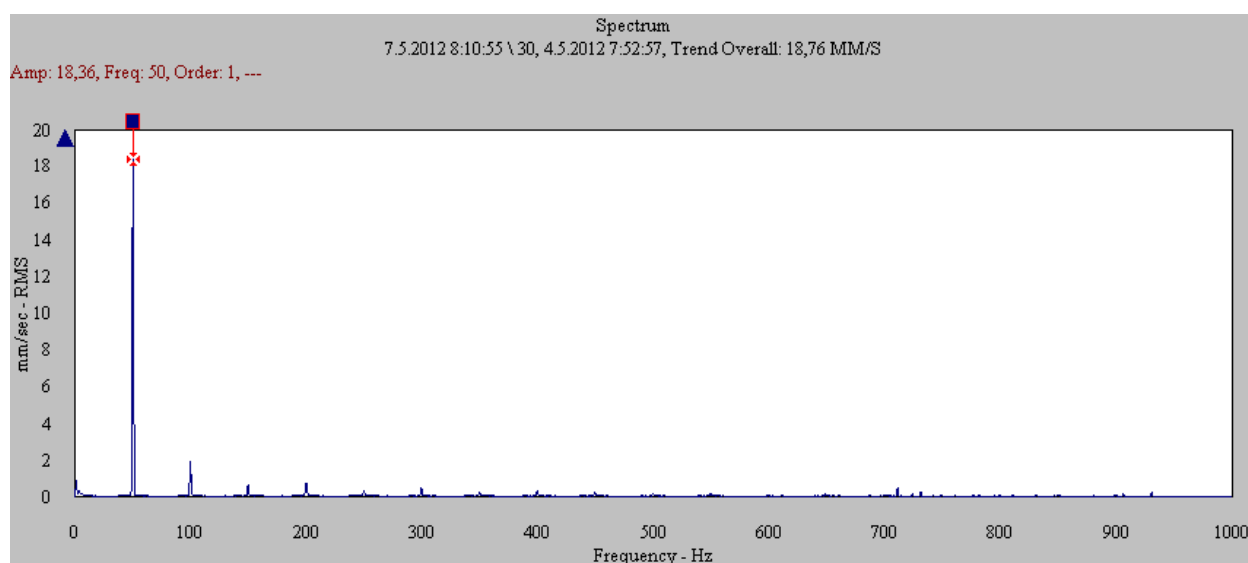
Popis experimentu: Měření se provádí stejnou metodou ve vertikálním a horizontálním směrech. Měřiči body jsou schematicky uvedené na obrázku č. 20.



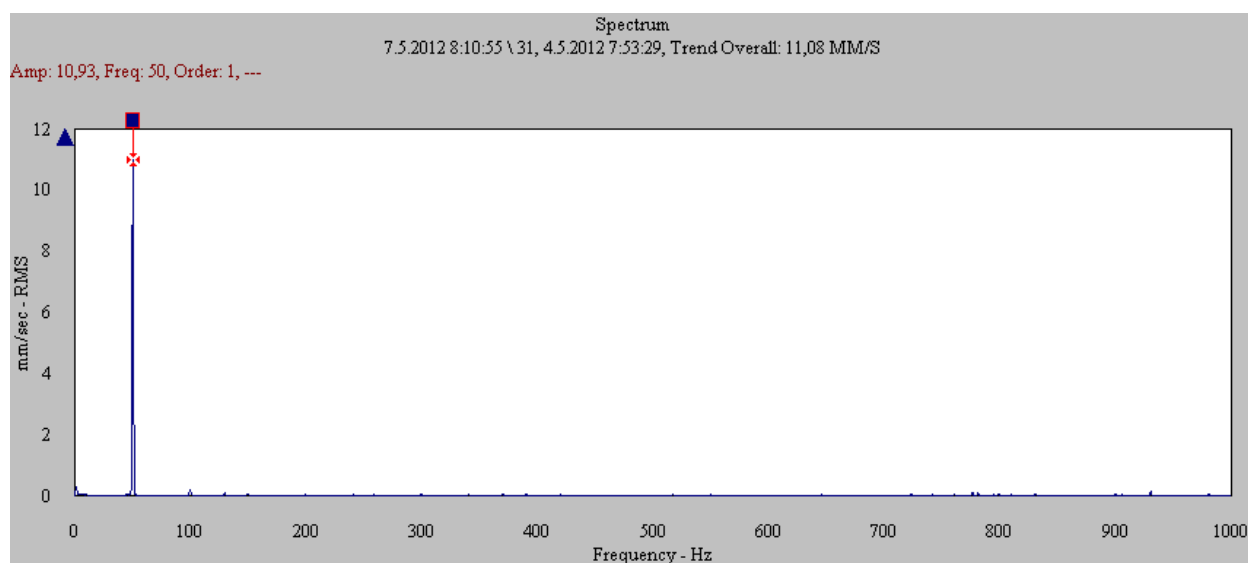
Obr. 20. Měření vibrací elektromotoru brusky B175-04 ve vertikálním směru (body 1 a 3) a horizontálním směru (body 2 a 4).



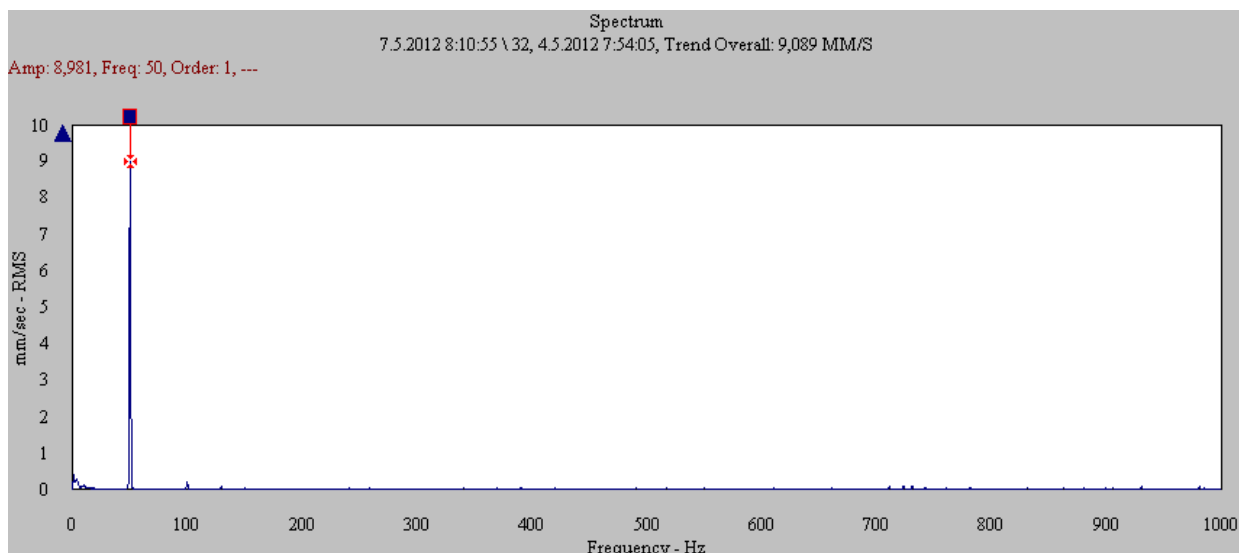
Obr. 21. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru brusky typu B 175-04 firmy ELKO ve vertikálním směru roviny I v bodě 1.



Obr. 22. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru brusky typu B 175-04 firmy ELKO v horizontálním směru roviny I v bodě 2.



Obr. 23. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru brusky typu B 175-04 firmy ELKO ve vertikálním směru roviny II v bodě 3.



Obr. 24. Spektrum rychlosti vibrací elektromotoru brusky typu B 175-04 firmy ELKO v horizontálním směru roviny II v bodě 4.

Tab. 14. Hodnoty vibrací elektromotoru B 175-04:

	Frekvence, Hz	Amplituda, $mm \cdot s^{-1}$	Efektivní rychlost, $mm \cdot s^{-1}$
Bod 1	50	24,99	25,31
Bod 2	50	18,36	18,76
Bod 3	50	10,93	11,08
Bod 4	50	8,981	9,089

Výsledek:

Přípustná hodnota efektivní rychlosti pro daný elektromotor při pevném uložení a normálním stupni posouzení je $1,3 mm \cdot s^{-1}$. Takže ve všech bodech naměřené hodnoty efektivní rychlosti jsou mnohonásobně vyšší v porovnání s hodnotami předepsanými.

S ohledem na naměřené spektra vibrací lze říct, že základním problémem je nevyváženost rotoru brusky. Jako sekundární vady lze definovat poruchy ložisek, které nemohou nastat v důsledku namáhání ložisek dynamickým střídavým nesouměrným zatížením v následek čeho dojde k poklesu jejich životnosti až o 50 %. Tímto způsobem docházím výsledků, že elektromotor má závažné poškození a jeho oprava je nutná v nejkratší době. Do termínu možnosti opravy doporučuji tento stroj odstavit z provozu. Jinak může způsobit další závažnější poruchy stroje.

9. Závěr.

Z výsledků měření a hodnocení výsledků vyplývá, že u většiny elektromotorů jsou problémy, které se buď již objevily na mezi havarijního stavu (elektromotor Frézky Typ OR57, elektromotor brusky typu B 175-04 firmy ELKO) anebo potřebují další monitorování v dynamice (elektromotor 1LA7106-6AA-10z firmy SIEMENS).

V prvním případě včas provedená akustická a/nebo vibrační diagnostika je schopna zachránit stroj od závažných poruch, které by způsobily dražší opravu a nebo odstávku stroje z provozu, čímž by výrobní/ podnikatelská činnost byla vážně negativně ovlivněna.

Pro druhý případ akustická a vibrační diagnostika je výhodná tím, že během následující diagnostiky dokáže nejen vyhodnotit stav elektromotoru, ale i porovnat předem naměřené hodnoty s odpovídajícími hodnotami skutečnými. Tím lze získat dynamický průběh a rozvoj v čase poruch elektromotoru, co se s výhodou využívá pro odstranění příčin vzniku poruch, využití jednotlivých součástí stroje po celou dobu jejich životnosti, včasnou opravu a nebo obnovu jednotlivých částí, zabránění odstavek stroje z provozu, plánování údržby v budoucnu, zavádění proaktivní údržby.

Jako velkou výhodou akustické a vibrační diagnostiky vidím možnost jejího provedení v krátké době, bez komplikovaného a nebo obrovského měřicího zařízení, bez zvláštních laboratorních podmínek, bez odstávek strojů z provozu (měření in-situ) a zbytečného zásahu.

Praktická komplikace může vzniknout pokud není technická dokumentace ke zkoušenému stroji nebo není možné zjistit technické údaje (jako jsou například počet valivých tělísek a rozteč ložisek) z katalogů, jiným způsobem (například v případě, že elektromotor je velmi starý).

Hodnocení výsledků měření ne vždy je schopno ukázat poruchy přímo. Je to způsobeno tím, že ten okamžik, kdy porucha nastala nedokáže odhadnout nikdo. Pokud opotřebením nějaké součástky kvůli pracovní činnosti elektromotoru je v začáteční fázi, spektrum vibrací může mít velmi malé amplitudy, nízké hodnoty rychlosti a zrychlení. Ten projev není brán jako závazný, není potřeba kvůli tomu do elektromotoru zasahovat. Pokud je porucha v elektromotoru dlouhodobě, může způsobit vznik dalších poruch. Při tom na vibračních spektrech budou projevy všech poruch najednou, což jejich odhad a hodnocení komplikuje.

Statisticky je vidět, že elektromotory s častým rozběhem a doběhem pracují za horších podmínek než elektromotory s menším počtem zapínání-vypínání, což má velký vliv na jejich stav, dynamiku rozvoje poruch a četnost prohlídek.

Proto navrhuji provádět diagnostiku elektromotorů ihned na začátku jejich pracovního života (tím se dají snadno zjistit možné montážní problémy) a v předepsaném časovém rozsahu (tím se dá zjistit optimální kritický okamžik pro každý stroj).

Příloha A

Tab. 3.: Mezní hodnoty maximální velikosti vibrací v efektivních hodnotách výchylky, rychlosti a zrychlení
(z ČSN EN 60034-14 ed.2)

	Výška osy mm	$56 \leq H \leq 132$			$132 < H \leq 280$			$H > 280$		
Stupeň vibrací	Uložení	Výchylka μm	Rychlost $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Zrychlení $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$	Výchylka μm	Rychlost $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Zrychlení $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$	Výchylka μm	Rychlost $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Zrychlení $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$
N	Pružné	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Pevné	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
S	Pružné	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Pevné	–	–	–	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Poznámka: Stroje s výškou osy pod 132 mm není vhodné zkoušet při pevném uložení pro zvláštní kategorii vibrací.

Tab. 7.: Maximální hladina akustického výkonu A , $L_{W/A}$ v dB ve stavu naprázdno
(s výjimkou motorů podle tabulky č. 8, z ČSN EN 60034-9)

Jmenovitá otáčky n min^{-1}	$n \leq 960$				$960 < n \leq 1320$				$1320 < n \leq 1900$				$1900 < n \leq 2360$				$2360 < n \leq 3150$				$3150 < n \leq 3750$			
	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7	IC01 IC11 IC21	IC411 IC511 IC611	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7
Způsob chlazení (pozn.1)																								
Jmenovitý výkon P_N , kW																								
$1 \leq P_N \leq 1,1$	73	73	–	76	76	–	77	78	–	79	81	–	81	84	–	82	88	–	82	88	–	–	–	–
$1,1 < P_N \leq 2,2$	74	74	–	78	78	–	81	82	–	83	85	–	85	88	–	86	91	–	86	91	–	–	–	–
$2,2 < P_N \leq 5,5$	77	78	–	81	82	–	85	86	–	86	90	–	89	93	–	93	95	–	93	95	–	–	–	–
$5,5 < P_N \leq 11$	81	82	–	85	85	–	88	90	–	90	93	–	93	97	–	97	98	–	97	98	–	–	–	–
$11 < P_N \leq 22$	84	86	–	88	88	–	91	94	–	93	97	–	96	100	–	97	100	–	97	100	–	–	–	–
$22 < P_N \leq 37$	87	90	–	91	91	–	94	98	–	95	100	–	99	102	–	101	102	–	101	102	–	–	–	–
$37 < P_N \leq 55$	90	93	–	94	94	–	97	100	–	98	102	–	101	104	–	103	104	–	103	104	–	–	–	–
$55 < P_N \leq 110$	93	96	–	97	98	–	100	103	–	101	104	–	103	106	–	105	108	–	105	108	–	–	–	–
$110 < P_N \leq 220$	97	99	–	100	102	–	103	106	–	103	107	–	105	109	–	107	110	–	107	110	–	–	–	–
$220 < P_N \leq 550$	99	102	98	103	105	100	106	108	102	106	109	102	107	111	102	110	113	102	110	113	105	105	105	105
$550 < P_N \leq 1100$	101	105	100	106	108	103	108	111	104	108	111	104	109	112	104	111	116	104	111	116	106	106	106	106
$1100 < P_N \leq 2200$	103	107	102	108	110	105	109	113	105	109	113	105	110	113	105	112	118	105	112	118	107	107	107	107
$2200 < P_N \leq 5500$	105	109	104	110	112	106	110	115	106	111	115	107	112	115	107	114	120	107	114	120	108	108	108	108

Poznámka 1. Způsob chlazení je uveden ve tvaru zjednodušeného kodu, viz. Normu IEC 60034-6.

Příloha C

Tabulka č. 8.: Maximální hladina akustického výkonu A , L_{WA} v dB při chodu naprázdno
(pro jednootáčkové trojfázové asynchronní motory nakrátko se způsoby chlazení IC01,
IC11, IC21, IC411, IC511 a IC611, z ČSN EN 60034-9)

Jmenovitý výkon P_N , kW	8 pólů		6 pólů		4 pólů		2 pólů	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
$1,0 < P_N \leq 2,2$	70	71	70	71	70	71	78	85
$2,2 < P_N \leq 5,5$	73	76	73	76	73	76	83	88
$5,5 < P_N \leq 11$	77	80	77	80	78	81	88	91
$11 < P_N \leq 22$	81	84	81	84	85	86	91	94
$22 < P_N \leq 37$	84	87	84	87	88	91	93	100
$37 < P_N \leq 55$	86	90	87	91	91	95	95	101
$55 < P_N \leq 110$	89	93	91	95	95	98	97	104
$110 < P_N \leq 220$	94	97	96	99	99	102	100	107
$220 < P_N \leq 440$	96	98	98	101	102	105	103	109
$440 < P_N \leq 1000$	97	99	99	102	105	108	105	110

Příloha D

Vzor protokolu o zkoušce hluku

(z ČSN EN 60034-9 ed.2)

Typové číslo stroje, provozní podmínky a další identifikační údaje Typ, model, velikost, pomocná zařízení apod.	
Deklarované dvoučíselné (jednočíselné) hodnoty emise hluku pro jeden stroj (pro určitý typ a model stroje) odpovídající ČSN EN ISO 4871	
Akustické prostředí	
Použité přístroje a metoda	
Hladina akustického výkonu L_{WA} (ref. 1 pW), v decibelech	hodnota
Nejistota K_{WA} , v decibelech	hodnota
Hladina emisního akustického tlaku L_{pA} (ref. 20 μPa) na stanovišti obsluhy, v decibelech	hodnota
Nejistota K_{pA} , v decibelech	hodnota
Provozní podmínky: Chod naprázdno, zatížení, jmenovitý kmitočet, napětí, rozsah otáček apod. Montážní podmínky: Upevnění, poloha stroje apod.	
Datum měření:	

Poznámky:

- Jednočíselná deklarační hodnota emise hluku (angl. Declared single-number noise emission value) je součtem změřené hodnoty emise hluku a přiřazené nejistoty. Zaokrouhluje se na nejbližší celý decibel. Dvoučíselná deklarační hodnota (angl. declared dual-number noise emission value) uvádí změřenou hodnotu emise hluku a přiřazenou nejistotu zvlášť. Součet naměřené hodnoty emise hluku a přiřazené nejistoty reprezentuje horní hranici rozsahu hodnot.
- Naměřené hodnoty mohou být určeny pro jeden stroj, nebo jako průměr z většího počtu strojů.

Termíny a pojmy:

Hladina akustického tlaku L_p (angl. *sound pressure level*) – desetinásobek dekadického logaritmu poměru druhé mocniny akustického tlaku vyzařovaného zkoušeným zdrojem zvuku ke druhé mocnině referenčního akustického tlaku. Vyjadřuje se v decibelech.

Referenční akustický tlak P_0 : $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \mu Pa$

Hladina akustického výkonu L_w (angl. *Sound power level*) – desetinásobek dekadického logaritmu poměru akustického výkonu vyzařovaného zkoušeným zdrojem zvuku k referenčnímu akustickému výkonu. Vyjadřuje se v decibelech.

Referenční akustický výkon W_0 : $W_0 = 10^{-12} W$

Hladina akustického tlaku na ploše $\overline{L_{pf}}$ (angl. *surface sound pressure level*) – energetický průměr časově průměrovaných hladin akustického tlaku za všech poloh měřících bodů na měřící ploše s ohledem na korekce na hluk pozadí a na prostředí. Vyjadřuje se v decibelech.

Měřící plocha (angl. *measurement surface*) – myšlená plocha o obsahu S obklopující zdroj, na níž jsou umístěny body na kterých se měří. Měřící plocha končí na jedné nebo více odrazivých rovinách.

Emisní akustický tlak p (angl. *emission sound pressure*) – časově průměrovaný akustický tlak na stanoveném místě blízko zdroje hluku, když je zdroj v provozu za stanovených provozních a montážních podmínek na odrazivé rovině s vyloučením vlivu hluku pozadí anebo odrazu od jiných povrchů místnosti, než je rovina na níž stroj spočívá. Vyjadřuje se v pascálech.

Hladina emisního akustického tlaku L_p (angl. *emission sound pressure level*) – desetinásobek dekadického logaritmu poměru mocniny emisního akustického tlaku a mocniny referenčního akustického tlaku, měřena se zvoleným časovým a kmitočtovým vážením. Vyjadřuje se v decibelech.

Deklarace emise hluku (angl. *noise emission declaration*) – informace o hluku vyzařovaného strojem, poskytovaná výrobcem nebo dodavatelem v technické dokumentaci nebo v jiné literatuře obsahující hodnoty emise hluku.

Seznam zdrojů a literatury:

Knihy a skripta:

- [1] Chmelík, K. – Pospíšilík, J. *Ložiskové proudy v elektrických strojích*. Ostrava: VŠB-TU ve vydavatelství Montanex, 2008. 186 s. ISBN 9788072252909.
- [2] Chmelík, K. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB-TU, 2002. 135 s. ISBN 9788024800257
- [3] Havelka, J. – Dresler, J. *Montáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých*. 1. vydání. Praha: STRO.M, spol.s.r.o., 1995. 227 s.
- [4] Kreidl, M. – Šmíd, R. *Technická diagnostika*. Praha: BEN – Technická literatura, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [5] Leinveber, J. – Vávra, P. *Strojnické tabulky*. Pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 4. vydání. Úvaly: Albra, 2008. 914 s. ISBN 9788073610517
- [6] Němeček, P. – Tomeh, E. *Vibrační diagnostika základních závad strojů*. Skripta TUL. Liberec, 2010. 64 s.
- [7] Plíva, Z. – Drábková, J. *Metodika zpracování diplomových, bakalářských a vědeckých prací na FM TUL*. Skripta TUL. Liberec: FM TU, 2009. 38 s. ISBN 9788073721893
- [8] Sokanský, K. *Diagnostika elektromotorů*. Ostrava: VŠB-TU, .
- [9] Tomeh, E. *Diagnostic methodology of rolling elements and journal bearings*. Skripta TUL. Liberec: STAP, 2007. 66 s. ISBN 9788073722784
- [10] Vlk, F. *Diagnostika motorových vozidel*. Brno: Vlk, 2006. 444 s. ISBN 80-239-7064X
- [11] *Technická diagnostika elektrických strojů a kabelů*. Odborné materiály od CMMS.

Periodická vydání :

- [12] Bate, G. *Vibration diagnostic for Industrail Elektrik Motor Drives*. Aplikační list firmy Bruel a Kjaer, Dánsko: Naerum Offset.
- [13] Herr, G. *Qualifying Elektric Motors On-Line*. Aplikační list CM3033 firmy SKF, Švédsko: SKF Condition Monitoring, Inc., 1997. 4 s.
- [14] Jones, B. *Přehled monitorování střídavých indukčních motorů*. Aplikační list CM3029 firmy SKF, Švédsko: SKF Condition Monitoring, Inc., 1997. 4 s.
- [15] Kutnohorský, V. *Ložiskové proudy*. Časopis «Elektrotechnika v praxi», Ostrava: BAEL, březen, duben 2002. 2 s.

Elektronické zdroje:

- [16] Chmelík, K. – Pospíšilík, J. *Diagnostika poškození ložiska průchodem elektrického proudu* [online]. CMMS – Condition Monitoring & Maintenance Systems (Prediktivní údržba a technická diagnostika), 3 s., URL:<<http://www.cmms.cz/elektromotory/180-diagnostika-poskozeni-loziska-pruchodem-elektrickeho-proudu.html>>.
- [17] Moravec, V. *Elektromotory SIEMENS* [online]. 1 s., URL:<<http://www.elektromotory.net/siemens/11a7-1000-otacek/11a7-106-6aa.html>>.
- [18] Sokanský, K. *Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter* [online]. CMMS – Condition Monitoring & Maintenance Systems (Prediktivní údržba a technická diagnostika), 3 s., URL:<<http://www.cmms.cz/elektromotory/179-diagnostika-vybranych-poruch-asynchronnich-motoru-pomoci-proudovych-spekter.html>>.
- [19] Tomeh, E. *Přednášky z technické diagnostiky* [online]. Stránka katedry vozidel a motorů technické university v Liberci, 385 s., URL:<www.kvm.tul.cz/technicka-diagnostika/prednasky-z-predmetu>.
- [20] Valent, O. *Komplexní řešení preventivní, autonomní, prediktivní a proaktivní údržby* [online]. CMMS, s.r.o. Řízení & Údržba Průmyslového Podniku, 2010, 5 s., URL:<[http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&tx_ttnews\[tt_news\]=3584&tx_ttnews\[backPid\]=1261&cHash=282460c3a1](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&tx_ttnews[tt_news]=3584&tx_ttnews[backPid]=1261&cHash=282460c3a1)>.
- [21] Autor není uveden. *Elektromotor (originální název «Електромотор»)* [online], Videomateriál, Youtube, 2011. URL:<<http://www.youtube.com/watch?v=HCkROxsxjxA&feature=related>>.
- [22] Autor není uveden. *Katalog elektromotorů firmy MEZ* [online]. 30 s., URL:<http://www.electrostal.com.ua/pdf/Mogilev_katalog.pdf>.

Seznam ČSN :

- [23] ČSN EN ISO 1680 (011656) *Akustika – Zkušební předpis pro měření hluku šířeného vzduchem, vyzařovaného točivými elektrickými stroji*. 2000, 24 s.
- [24] ČSN ISO 1925 *Vibrace – Vyvažování – Slovník*. 2003. 64 s.
- [25] ČSN ISO 1940-1 (011410) *Požadavky na jakost vyvážení rotorů v konstantním (tuhém) stavu – Část 1: Stanovení vyvažovacích tolerancí a ověření nevyváženosti*. 2005. 32 s.

- [26] ČSN ISO 1940-2 (011410) *Požadavky na jakost vyvážení rotorů v konstantním (tuhém) stavu – Část 2: Chyby spojené s vyvažováním*. 1992. 20 s.
- [27] ČSN ISO 2954 (356859) *Vibrace strojních zařízení s rotačním a vratným pohybem. Požadavky na přístroje pro měření mohutnosti vibrací*. 1994. 12 s.
- [28] ČSN EN ISO 4871 (011609) *Akustika - Deklarování a ověřování hodnot emise hluku strojů a zařízení*. 2010. 24 s.
- [29] ČSN ISO 7919-3 (011414) *Vibrace strojů s nevratným pohybem – Měření na rotujících hřídelích a kritéria hodnocení – Část 3: Průmyslová soustrojí*. 2010. 12 s.
- [30] ČSN ISO 8821 (011408) *Mechanické kmitání - vyvažování - dohoda o rotorech a strojních částech spojovaných pery*. 1992. 16 s.
- [31] ČSN ISO 10816-3 (011412) *Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 3: Průmyslové stroje s jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 min⁻¹ a 1500 min⁻¹ při měření in situ*. 1998. 24 s.
- [32] ČSN ISO 10817-1 *Zařízení pro měření vibrací rotujících hřídelů - Část 1: Relativní a absolutní snímání radiálních vibrací*. 2000. 28 s.
- [33] ČSN ISO 13373-2 (011440) *Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 2: Zpracování, prezentace a analýza vibračních dat*. 2005. 36 s.
- [34] ČSN EN 60034-7 *Točivé elektrické stroje - Část 7: Označování tvarů strojů a polohy svorkovnice*. 2001. 28 s.
- [35] ČSN EN 60034-9 ed. 2 (350000) *Točivé elektrické stroje – Část 9: Mezní hodnoty hluku*. 2005. 20 s.
- [36] ČSN EN 60034-14 ed. 2 (350000) *Točivé elektrické stroje – Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou od 56 mm – Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. 2008. 22 s.
- [37] ČSN EN 61672-1 (368813) *Elektroakustika – Zvukoměry – Část 1: Technické požadavky*. 2003. 36 s.